

熱アシスト磁気記録における熱的安定性を考慮
した媒体特性の検討



平成 22 年度

三重大学工学研究科物理工学専攻

澤田 章弘

目次

第1章 序論.....	1
1-1 はじめに.....	1
1-2 磁気記録.....	1
1-2-1 磁気記録の方式.....	1
1-2-2 記録と再生.....	2
1-2-3 GMR 効果.....	4
1-2-4 TMR 効果.....	5
1-2-5 ヘッド磁界の上限.....	6
1-3 磁気記録のトリレンマ.....	8
1-4 ビットパターンドメディア (Bit Patterned Media:BPM)	9
1-5 熱アシスト磁気記録 (TAMR)	9
1-5-1 原理.....	9
1-5-2 記録方式.....	10
1-5-3 問題点.....	11
1-6 計算方法の特徴.....	12
1-7 bit Error Rate(bER)	12
1-8 ECC(Error Correcting Code)	12
1-9 本研究の目的と概要.....	14
第2章 シミュレーション方法.....	15
2-1 はじめに.....	15
2-2 導出方法.....	15
2-2-1 分子場近似.....	15
2-2-2 フェロ磁性体分子場近似.....	15
2-2-3 ニュートン法.....	17
第3章 計算条件.....	18
3-1 2Tbpsi, granular, TG.....	18
3-1-1 記録領域周辺.....	18

3-1-2	ヘッド磁界の分布.....	19
3-1-3	計算条件.....	20
3-1-4	熱揺らぎ指標.....	21
3-1-5	計算アルゴリズム.....	23
3-2	4Tbpsi, granular, TG.....	24
3-2-1	記録領域周辺.....	24
3-2-2	ヘッド磁界の分布.....	25
3-2-3	計算条件.....	25
3-2-4	熱揺らぎ指標.....	26
3-2-5	計算アルゴリズム.....	28
3-3	2Tbpsi, granular, FG.....	29
3-3-1	計算条件.....	29
3-3-2	熱揺らぎ指標.....	30
3-3-3	計算アルゴリズム.....	30
3-4	2Tbpsi, granular, DG.....	30
3-4-1	計算条件.....	30
3-4-2	熱揺らぎ指標.....	31
3-5	bit Error Rate(bER).....	32
3-5-1	記録領域における熱揺らぎ指標.....	32
3-5-2	反転エラー確率.....	33
3-5-3	計算条件.....	33
第4章	シミュレーション結果.....	34
4-1	はじめに.....	34
4-2	計算結果.....	34
4-2-1	Field Gradient 方式 (2Tbpsi).....	34
4-2-2	膜厚依存性 (2Tbpsi、TG)	35
4-2-3	膜厚依存性 (4Tbpsi、TG)	38
4-2-4	飽和磁化依存性 (4Tbpsi、TG)	40
4-2-5	記録温度磁化依存性 (4Tbpsi、TG)	43
4-2-6	Dual Gradient 方式 (2Tbpsi).....	46
4-3	Fe-Pt-Cu (4Tbpsi、TG)	47
4-3-1	はじめに.....	47
4-3-2	計算アルゴリズム.....	48

II

4-3-3 計算結果.....	49
4-4 bit Error Rate(bER).....	53
第 5 章 総括.....	55
謝辞.....	58
参考文献.....	59

第1章 序論

1-1 はじめに

現在、身の回りにはさまざまなデータが存在し、増え続けている。データが急激な勢いで増加している理由として、インターネットや IT の普及、デジタル放送への移行や音楽のネット配信などによって動画や音楽などの高容量データを取り扱う機会が増えたこと、さまざまな地域や企業で電子化（デジタル化）されたデータが扱われるようになってきていること、今まで紙で保持していたデータをスキャンなどで電子データへ移行することによるデータの増加などが挙げられる。情報ストレージ（蓄積）技術は、私たちの身近な情報だけでなく、国や企業の機密事項から文化・芸術・科学などのあらゆる分野の貴重なデータを蓄えるために必要な技術である。情報ストレージメディアには、ハードディスクドライブ（Hard Disk Drive: HDD）だけでなく、磁気テープや光ディスク、フラッシュメモリなどがあるが、記録容量やビット当たりの単価、書き込み速度、体積当たりの記録密度などで、HDD が情報ストレージメディアの要件を最も満たしている。情報量の急激な増加とともに、これを蓄積保存する容れ物が問題になり、場所を取らずに大量に入ることが常に求められている。また今後の低炭素化社会実現のため、大規模化した情報ストレージの省エネルギー・低消費電力化を図ることが社会全体の課題となっている。このような背景から HDD の更なる大容量化、高密度化が常に求められている。

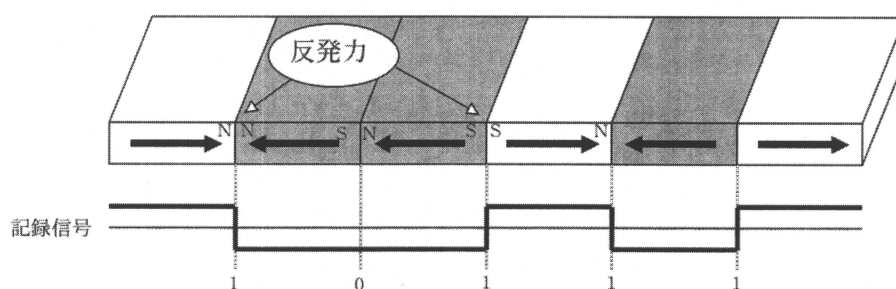
HDDの記録密度は1990年代に10年で100倍に増え⁽¹⁾、急速に発展し、高密度化を進めてきた。しかし、磁性微粒子の微細化による超常磁性（superparamagnetism）限界の影響があり、最近では記録密度の向上に歯止めがかかっている。超常磁性限界とは、記録媒体に情報を記録する磁性層を構成する微細磁性粒子の体積をさらに小さくしていくと、熱的安定性が悪化し、温度等の影響により粒子内の磁化方向が乱されてしまうことである。この超常磁性限界により記録された情報を保持できなくなるという問題が生じる。このような問題を解決し、記録密度を飛躍的に高めるためには、新しい磁気記録方式への移行が必要である。そのための有望な記録方式の一つに熱アシスト磁気記録（Thermally Assisted Magnetic Recording: TAMR）が考え出され、実用化に向けて現在も研究が続けられている。

1-2 磁気記録⁽²⁾

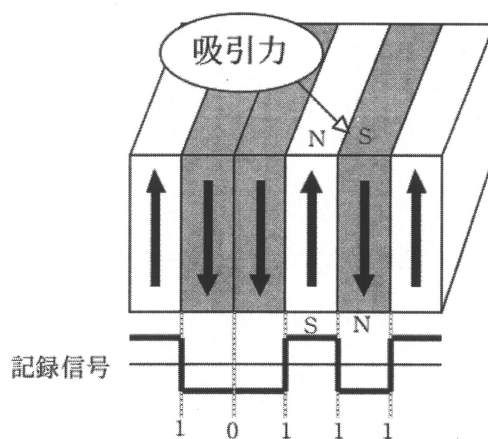
1-2-1 磁気記録の方式

磁気記録は、磁化の向きによって0 と1 の2 進数をあてはめて記録している。磁化の向き(棒磁石のN 極とS 極) が反転したときに0、1 が入れ替わるしくみを用いている。

これまで図1-1 (a) のようにデータの記録磁化方向がディスク媒体と平行な向きである面内磁気記録方式が用いられてきた。面内磁気記録方式では、情報を記録する際に記録ビットの磁化を反転させるとN 極とN 極、またはS 極とS 極が隣接し、反発力が生じてしまう。そのため記録密度を高めていくと記録された磁化どうしが打ち消しあってしまう。この弱点を克服するための新たな記録方式として、図1-1 (b) のように磁化が記録面に沿って垂直方向に配置する垂直磁気記録方式が挙げられる。この方式を用いると、磁化を反転させたときN 極とS 極が互い違いに並び、吸引力が生じるため、記録密度を高めても記録した情報が保持されやすくなる。



(a) 面内磁気記録



(b) 垂直磁気記録

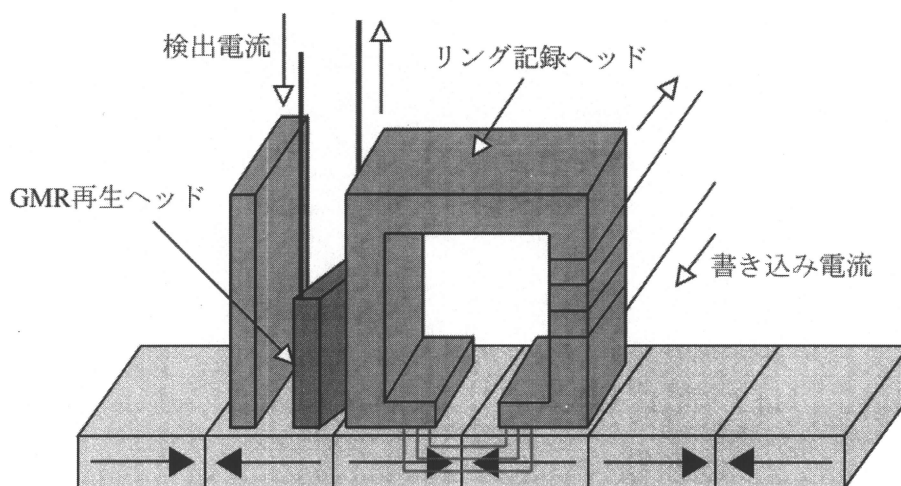
図 1-1 記録方式

1-2-2 記録と再生

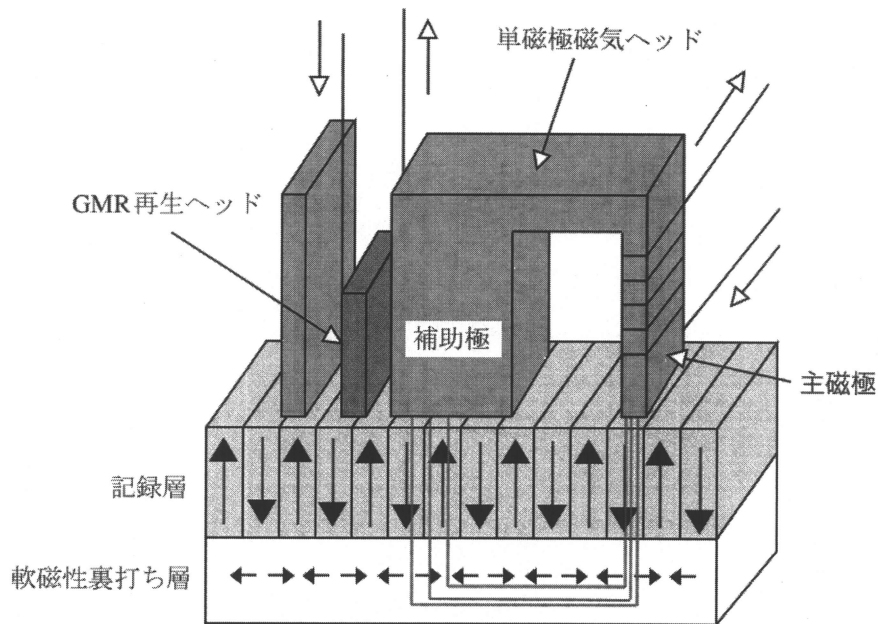
磁気記録には、磁気ヘッドが用いられており、磁気ヘッド内部のコイルに電流を流すことで

磁界を発生させ、記録を行う。面内磁気記録では、図1-2 (a) のようにリング型の磁気ヘッドが用いられており、これを用いることにより、磁気記録層に対して面内方向に磁界をかけて情報を記録する。一方、垂直磁気記録方式では、図1-2 (b) のような単磁極型の磁気ヘッドが用いられている。単磁極型の磁気ヘッドはコイル、主磁極、補助極で構成されており、主磁極を細くすることにより、磁束密度を高くし、記録している。さらに、媒体側に軟磁性裏打ち層(SUL : Soft UnderLayer) と呼ばれる磁性層を設けることで、磁気記録層に垂直な磁界をかけ、磁気ヘッドと軟磁性裏打ち層との磁気的な相互作用により、大きな磁界を発生することができる。

再生には記録用の磁気ヘッドとは別に再生専用のヘッドが用いられている。最近では、磁気抵抗効果(物質の電気抵抗が磁場により変化する現象)を利用したGMR (Giant Magneto Resistance) ヘッドやTMR (Tunneling Magneto Resistance) ヘッドを用いて情報を検出している。GMR とは巨大磁気抵抗のことであり、常にGMR ヘッドに一定の電流を流しておけば、記録層表面から漏れる磁界の向きにより電気抵抗が変化するため0、1 のデジタル情報を読みとることができる。またTMRとはトンネル磁気抵抗のことであり、厚さ数ナノメートル以下の非常に薄い絶縁体(トンネル障壁という)を2枚の強磁性金属の電極で挟んだ素子をトンネル磁気抵抗素子(TMR素子)という。2つの強磁性電極の磁化の相対的な向きが平行な時と反平行な時で、TMR素子の電気抵抗が変化することでデータの0か1を判断する。



(a) 面内磁気記録



(b) 垂直磁気記録

図1-2 記録と再生方式

1-2-3 GMR 効果⁽³⁾

磁場をかけると電気抵抗 r が変化する現象を磁気抵抗効果と言う。磁化が反平行のときの電気抵抗 R_{ap} と磁化が平行のときの抵抗 R_p を比較すると、 R_{ap} の方が R_p に比べ大きくなり、 R_{ap} と R_p に差が生じる。 R_{ap} と R_p の差を $\Delta R = R_{ap} - R_p$ とする。通常の磁気抵抗比 $\Delta R / R_p$ (MR比)が数%であるのに対し、膜厚1nm程度の磁性層と非磁性層を交互に積層した多層構造の薄膜で、強磁性金属と非磁性(または、反強磁性)金属を交互に積層した多層膜には数十%以上のMR比を示すものがある。このような現象をGMR効果と呼び、HDDの再生用ヘッドに用いられている。抵抗変化は、印加された磁界により、磁性層の磁化が反平行に並んでいたものが平行になることで、磁性層/非磁性層の界面での電子の散乱確率が変わってしまうために起こるとされている。

GMR効果は1988年発見され、その際、Fe層間にCrを挟み積層させたFe/Cr多層膜が用いられた。また、フェロ磁性体であるCoの層間にCuを挟み積層させたCo(7.5 Å)/Cu(9.3 Å)多層膜のMR比は80%となり、非常に大きな値を示している。図1-3は横軸が印加磁界、縦軸がMR比を表している。

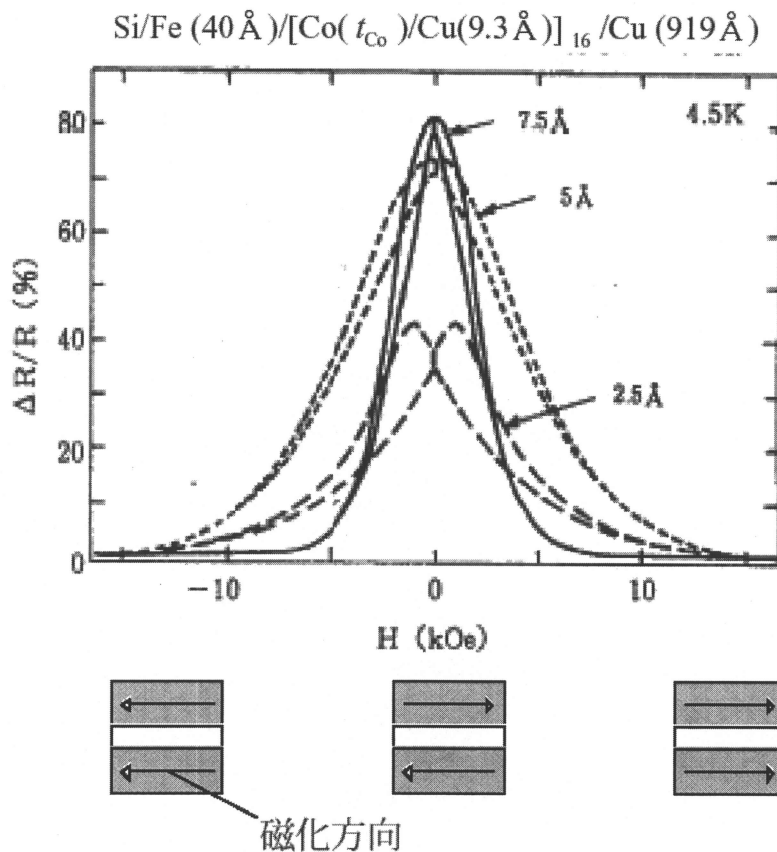
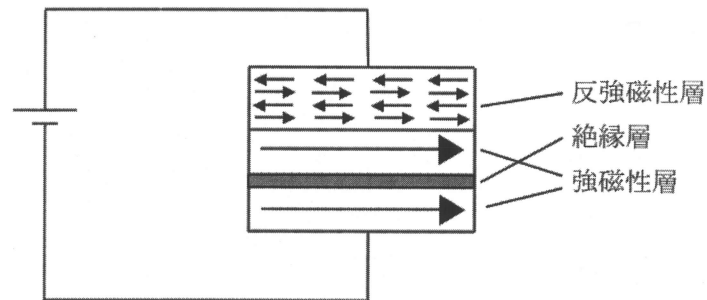


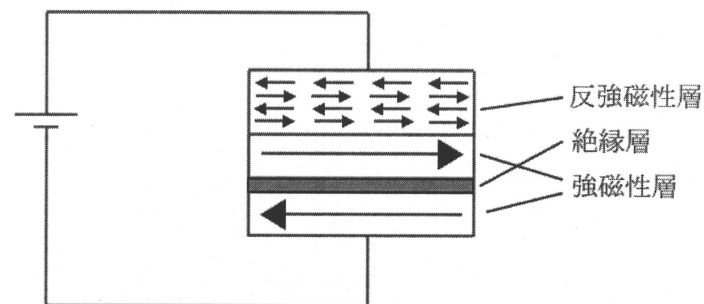
図1-3 Co膜厚とMR比⁽⁴⁾

1-2-4 TMR 効果^{(5),(6)}

TMR とは図 1-4 に示すように、絶縁層の両側から 2 枚の強磁性層ではさんだ構造を持つ接合（強磁性トンネル結合）において発現する巨大磁気抵抗効果のことである。2 枚の強磁性層の間に電圧をかけると、マイナス側の強磁性層中の電子が絶縁層をくぐり抜けてプラス側の強磁性層中に量子力学的にトンネルをする。このとき、両方の強磁性層の磁化の向きが互いに平行な場合は抵抗が低くなり、反平行な場合には抵抗が高くなる。その抵抗は両磁性層の磁化の方向の相対角度に応じて変化する。普通は、外部からの磁場に対して両方の磁性膜が同じように回転するのを防ぐために片側の磁性層は磁氣的に固定される。片側の磁性層を固定するのに反強磁性層を用いた交換結合を利用している。得られる磁気抵抗変化率（MR 比）は、TMR 膜では 20~50%の大きな値が期待される。絶縁層に関しては長い間 Al_2O_3 膜が用いられていたが、2004~2005 年頃より MgO 絶縁層が開発され、200~300%の大きな MR 比が得られることが見出された。



(a) 磁石の向きが平行なとき
素子の電気抵抗 (R_p) : 小さい



(b) 磁石の向きが反平行なとき
素子の電気抵抗 (R_A) : 大きい

$$\text{磁気抵抗値} = (R_A - R_p) / R_p (\%)$$

$$\text{素子抵抗} = R_p (\Omega(\mu\text{m})^2)$$

図 1-4 TMR 素子のトンネル磁気抵抗効果 (TMR 効果)

1-2-5 ヘッド磁界の上限

情報を記録するには磁気ヘッドを使い、局所的に強い磁界をつくることで記録媒体の磁化を反転させ書き込みを行う。しかし、書き込みを行うヘッド磁界には上限があり、記録媒体の保磁力がヘッド磁界より大きい場合には記録できなくなってしまう。ここでは、リング型磁気ヘッドを例に説明する。リング型磁気ヘッドは、図 1-5(a)のようなリング型の軟磁性磁心にコ

イルを巻いた構造をしている。コイルに電流 i を流すと、 i により磁界 H_1 が生じる。その影響により、図 1-5(b)のように軟磁性磁心は磁化され、磁気ヘッドのギャップに磁極が現れ、磁界 H_2 が生じる。また、 H_2 の向きを変えるには、 i の向きを逆にして H_1 の向きを変えればよい。

磁束密度 B は $B = H + 4\pi M_s$ で表せ、 M_s は軟磁性磁心の飽和磁化である。磁束密度 B は連続であるため、図 1-5(c)より $B_1 = B_2$ となる。したがって H_2 の大きさは、

$$H_2 = 4\pi M_s \quad (1-1)$$

と表される。 H_2 は M_s のみに依存するため、 H_1 を大きくしても H_2 の大きさは変わらない。そのため、 H_2 の大きさには限度がある。

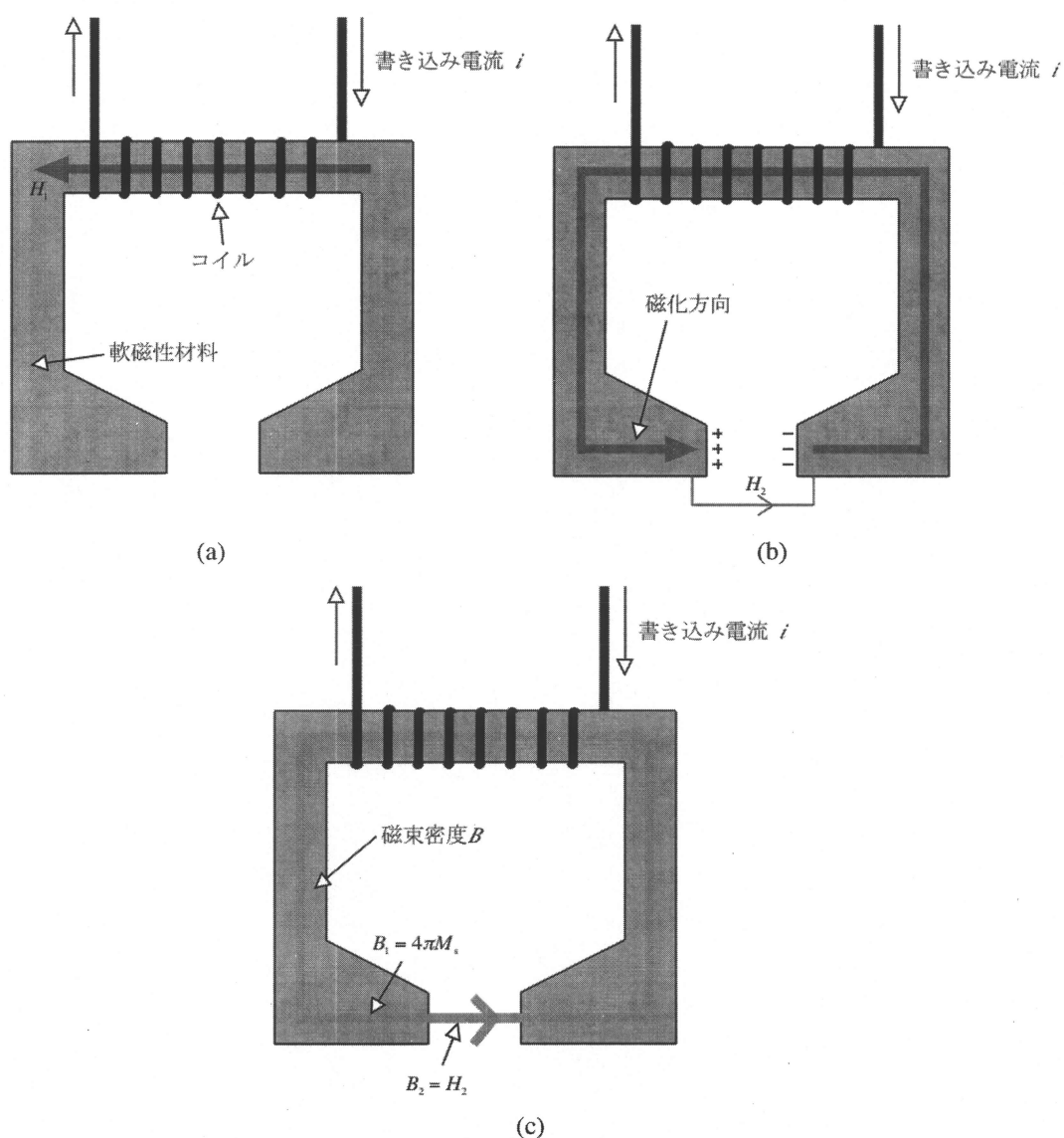


図 1-5 磁気ヘッドの書き込み

1-3 磁気記録のトリレンマ (trilemma)

磁気記録では、図 1-6 のように記録媒体は磁性微粒子の不連続媒体で作られていて、それぞれの磁性微粒子は単磁区構造となっている。図 1-6 の磁性微粒子の色は磁化の向きを表しており、そして複数の微粒子で 1bit の情報を担っている。情報を記録する際に、磁気ヘッドから局所的に強い磁界を発生させ、記録媒体の磁化を反転させることによってデータの記録を行う。この発生磁界の強さはコイルの中の軟磁性材料の飽和磁束密度に比例する。

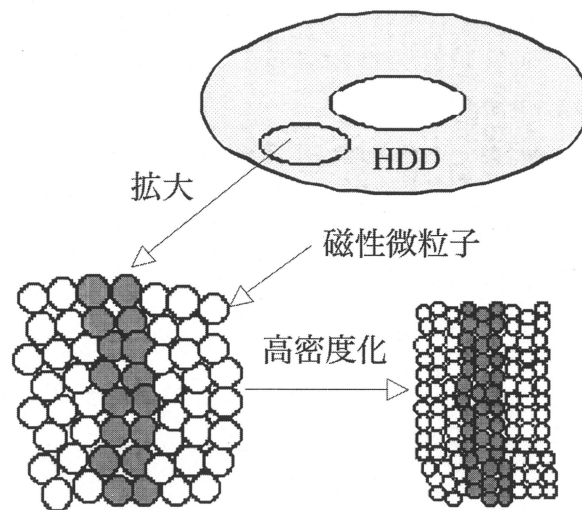


図 1-6 磁気記録媒体の構成図

また、磁性微粒子には磁化方向を保とうとする磁氣的エネルギーが存在するが、熱的エネルギーがこれを乱そうとする。ここで、磁性微粒子 1 個の体積を V 、磁性微粒子の磁気異方性を K_u 、ボルツマン定数を k 、絶対温度を T とすると記録情報の熱的安定性における磁性微粒子の熱揺らぎ指標は磁氣的エネルギーの熱的エネルギーに対する割合

$$\frac{K_u V}{kT} \quad (1-2)$$

で表される。この値が小さいと熱擾乱によって記録情報が時間とともに失われていく。不連続媒体の場合、記録密度を高めるためには、記録領域の境界の凹凸を減らさなければならない。そのために図1-6のように磁性微粒子を小さくしなければならないが、 V を小さくしようとすると、(1-2) 式が小さくなり記録を保持できない。そこで、 V を小さくするために K_u を大きくすることが考えられる。しかし、情報を記録する際のヘッド磁界 H には上限があり、またそのヘッド磁界が磁性微粒子の保磁力 H_c 。

$$H_c \propto \frac{2K_u}{M_s} \quad (1-3)$$

よりも大きくななくてはならない。ここで、 M_s は磁性微粒子の飽和磁化である。このため K_u の大きさにも上限が生じてしまう。

このように熱的安定性を保ちながら磁性微粒子を小さくすると、微粒子体積、熱的安定性、保磁力の3つの条件を同時に満たす事が難しくなる。これは磁気記録のトリレンマ (trilemma) と呼ばれ、今後の記録密度向上の大きな課題となっている。

1-4 ビットパターンドメディア (Bit Patterned Media:BPM)

熱的安定性の問題を解決する方法として、ビットパターンドメディア (Bit Patterned Media: BPM) の使用が挙げられる。BPMは磁性材料を記録ビットごとに、人工的に規則正しく配列させ図1-7のようにその領域において単磁区で記録させる。磁気記録では1bitを複数個 n の磁性材料を使って記録しているが、BPMでは1bitを nV の体積を持つ1つの領域で記録するので、熱揺らぎ指標が $K_u nV / kT$ になり、記録密度が飛躍的に上昇して熱安定性を確保することができる。

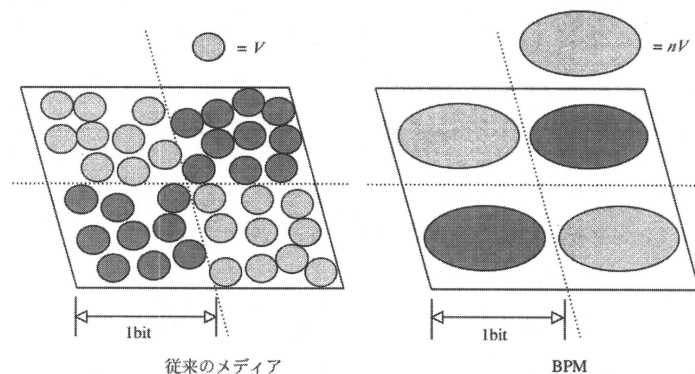


図1-7 BPMの原理

1-5 熱アシスト磁気記録 (Thermally Assisted Magnetic Recording:TAMR)^{(7),(8),(9)}

1-5-1 原理

熱揺らぎ問題を解決するには、単純には K_u の大きい材料を使えばよい。しかし、 H_c が K_u に比例して大きくなるため、現行のヘッドでは記録できなくなる。熱アシスト磁気記録 (Thermally

Assisted Magnetic Recording (TAMR) 方式とは、記録時にレーザーにより対象となる微小なエリアを加熱し、磁性微粒子の H_c を小さくし情報を記録する方式である。この方式を使うと、室温において記録する際のヘッド磁界 H よりも大きな H_c を持つ磁性材料を用いることができる。そのため、 K_u を大きくする事ができ、熱安定性の目安である(1-2)式を小さくせずに V を小さくすることができ、高密度記録が可能である。図1-8は典型的な磁気記録媒体の保磁力 H_c の温度変化である。

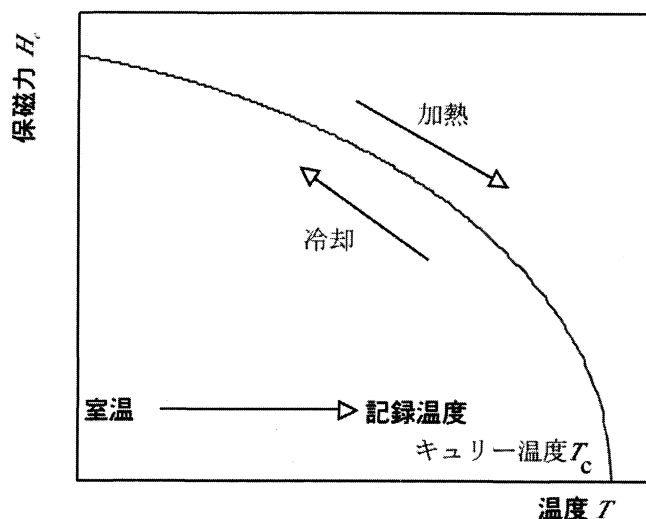


図1-8 保磁力 H_c の温度変化

1-5-2 記録方式

Thermal gradient方式 (TG) は、記録領域を含む媒体の広い領域に磁界を印加する。媒体の保磁力が大きいためこの磁界のみでは磁化反転しない。記録領域のみに光を照射して加熱し、その部分の保磁力を下げ、記録を行うものである。図1-9(a)にThermal gradient方式を示す。Thermal gradient方式のほかにField gradient方式、Dual gradient方式がある。Field gradient方式 (FG) は、記録領域を含む広い領域を加熱し、記録領域のみに磁界を印加して記録する方法である。図1-9(b)にField gradient方式を示す。また、Dual gradient方式 (DG) は、記録領域のみを加熱し、かつ記録領域のみに磁界を印加する方法であるが、そのような磁気ヘッドを作製することが困難であるという問題がある。図1-9(c)にDual gradient方式を示す。

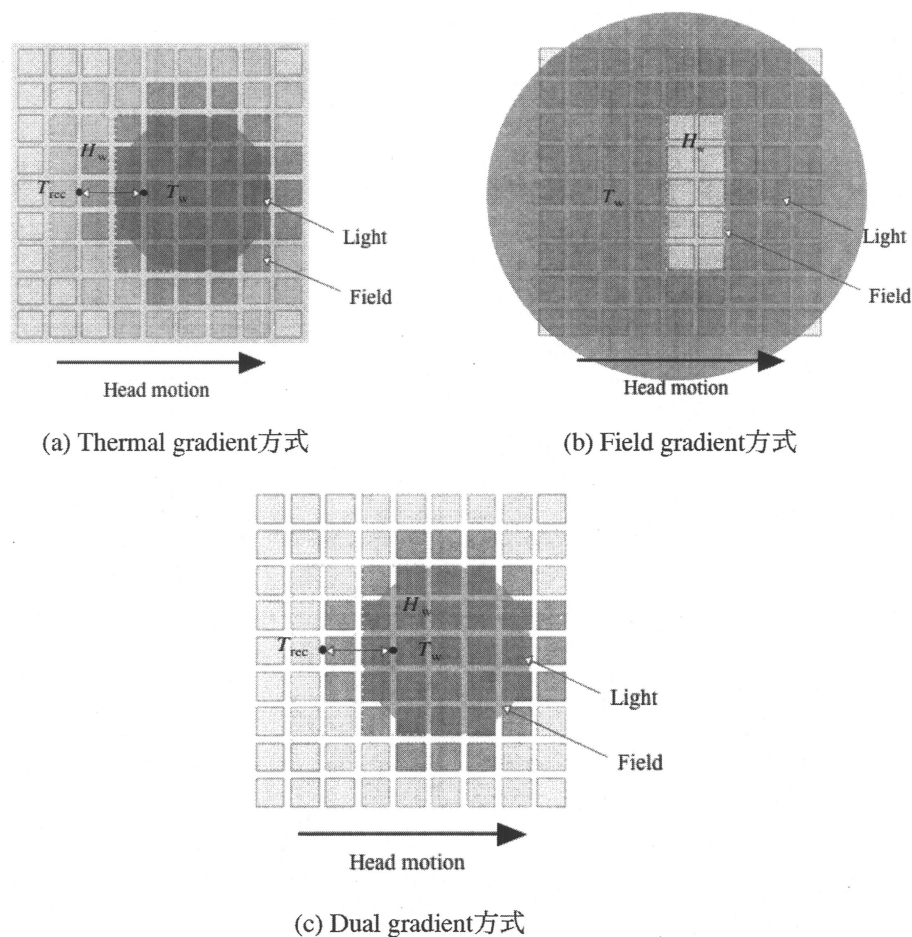


図1-9 TAMRの記録方式

1-5-3 問題点

記録過程の直後には、短時間ではあるが媒体が高温になっている状態が続く。媒体が冷却されて (1-2) 式が安定限界より大きくなるまで、記録直後の媒体が高温になっている時間において熱揺らぎが加速されてしまう。記録後の冷却過程において、記録方向とは逆向きに磁界が加わることも考えられる。記録領域からトレーリング側に 1 ビットずれた位置の情報について、逆向きの磁界がかかっている状態でも、ある時間、記録された磁化の方向を安定にしなければならぬ。また、記録後の隣接トラックにおいても加熱源が記録ビットを通過するごとに熱揺らぎが加速される。1 回の劣化はわずかであっても、 10^5 回もの通過を想定すると無視できなくなる。TAMR の問題点を解決する方法の 1 つとしては、熱伝導度の高い薄膜をヒートシンク層として厚く堆積し、同時に加熱スポットを小さくすることなどで、媒体の冷却速度を速くし熱揺らぎ加速を低くおさえることが有効である。媒体の温度が高くなる時間が短いので、記録の劣化量を少なくできる。

1-6 計算方法の特徴

磁化方向によって信号を記録している磁気記録において、磁化分布の解析は非常に重要なものである。これまでは磁化分布の主な解析方法として、マイクロマグネティクスに基づく数値計算を行う方法が行われてきた。その方法の1つにLLG方程式を差分法で解く方法がある⁽¹⁰⁾。この方法では、飽和磁化、交換エネルギー定数、異方性定数、磁化容易軸の方向などを磁性膜の物性値として指定することで、種々の磁性膜材料をモデル化することができる。しかし、マイクロマグネティクスに基づく磁化分布の解析には、通常非常に膨大な計算が必要であり、高性能なコンピュータを用いても、計算に非常に長い時間がかかってしまう。また異方性定数 K_u 、飽和磁化 M_s 、キュリー温度 T_c 、膜厚 t などのパラメータ間の複雑な相互関係が分かりにくいという欠点があった。

今回の研究では、周囲温度の最大330K、無磁界で10年間のデータ保持のために熱揺らぎ指標が60以上必要であるとし、そこから記録時、記録後、隣接トラックでの熱揺らぎ指標の条件を解析的に計算する。磁気特性は分子場近似により計算する。今までなかった計算により計算量を比較的少なくでき、計算にかかる時間を短くすることができる。またパラメータ間の相互関係がよくわかり、媒体の設計指針が考えやすくなる。

1-7 bit Error Rate(bER)⁽¹¹⁾

グラニュー媒体では1bitを何個かの粒子を使って記録しているが、これまで記録に使用した粒子は全て記録できていると仮定してきた。しかし、実際はその何個かの粒子全部が記録できる訳ではない。ごく稀に、記録磁界の方向と反対方向の磁化をもった粒子が現れる。bERとはデータ再生のときに誤りの生じる確率のことで、ビット単位の誤り率である。通常10のマイナス何乗という表現が使われる。もし、 $bER=10^{-9}$ としたら、 10^9 個のデータから1個間違えがあることを意味する。bERはエラービット数をビット総数で割ることにより求められる。bERは 10^{-5} 程度必要であると考えられている。 10^{-5} は大きすぎる気がするかもしれないが、ECC(Error Correcting Code)をかけるので、実際にはエラーはほとんど起きない。

1-8 ECC(Error Correcting Code)

メモリや記憶装置からデータを読み取るとき、あるいは通信によりデータを受け取ったとき

などは、データに誤りが生じている可能性がある。つまり、送ったデータと受け取ったデータが異なる場合があるということである。受け取った側では、そのデータが正しいものなのか誤りがあるものなのかを判断することができないため、データを送るときに、元のデータに対して誤りを訂正できるようにするための冗長なデータを付け加えて送ることがある。この冗長なデータを「誤り訂正符号(ECC)」という。

データを読み込むと、ECC を生成して元の ECC と比較する。ECC の値が同じであれば、データにエラーがなく読み込めたことがわかる。ECC の値が異なると、データエラーが発生しているので、ECC から正しいデータを算出して、データを訂正する。ECC の仕組みを図 1-10 に示し、誤りのデータの検出、訂正の仕組みを図 1-11 に示す。

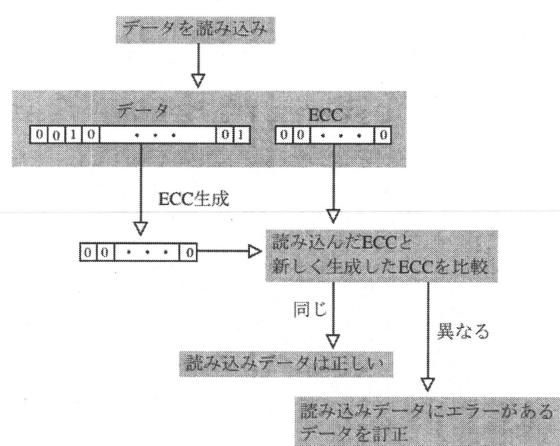


図 1-10 ECC の仕組み

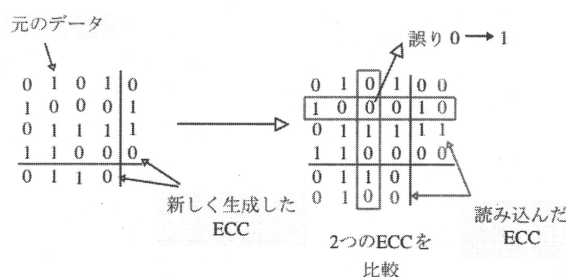


図 1-11 誤りのデータの検出、訂正の仕組み

記録密度 4Tbps の場合、線記録密度は 3200kFCI、トラック密度は 1440kTPI としているが、
 $\text{記録密度(Tbps)} = \text{線記録密度(kFCI)} \times \text{トラック密度(kTPI)}$ から記録密度を求めると記録密度
 4.6Tbps となる。4Tbps はユーザー側から見た記録密度であり、4Tbps をデータの書き込みに、
 残りの 0.6Tbps を ECC などを使うことを考えている。

1-9 本研究の目的と概要

近年の磁気記録の高密度化を妨げている主な原因は、磁性微粒子の微細化によって熱的安定性が悪化し、温度等の影響により微粒子内の磁化方向が乱されてしまうことである。これを解決する方法として、BPMやTAMR方式などの新しい技術が考えられている。本研究では記録方式にTAMR方式を取り入れることを考え、TAMR媒体として想定される問題についてシミュレーションを行い、解決を試みる。

TAMRにおいて、磁気ビットへの加熱プロセスにおける書き込み後の冷却過程と書き換えによる隣接トラックの情報安定性が問題とされる。そこで、分子場近似を用いて様々な条件を変えて磁気特性を計算し、TAMR媒体に適した磁気記録媒体の条件をシミュレーションにより評価する。

第1章では、磁気記録の方式や、高密度化により起こる問題、さらにBPMやTAMR方式について簡単に説明した。

第2章では、本研究で行ったシミュレーション方法について示す。

第3章では、本研究で行ったシミュレーションのTAMR媒体の微粒子サイズや熱揺らぎ指標などの計算条件を示す。

第4章では、TAMR媒体として、フェロ磁性体のグラニューラー媒体を記録媒体として用いて、様々な条件を変えて磁気特性を計算し、TAMR媒体に適した磁気記録媒体の条件を熱的安定性に考慮してシミュレーションした結果を示す。TAMR媒体としてFe-Pt-Cuを用いてシミュレーションをした結果も示す。また、記録媒体の条件を変えてbERを計算して、誤りが起こりにくい条件を検討する。

第5章では、本研究の総括を行う。

第2章 シミュレーション方法

2-1 はじめに

本章では、TAMR 媒体として、フェロ磁性体のグラニューラー媒体を使用することを想定し、媒体に必要な磁気特性の導出方法について説明する。

2-2 導出方法

2-2-1 分子場近似⁽¹²⁾

フェロ磁性体では、原子の磁気モーメントが交換相互作用によってある一定方向に、強く平行に配向している。各原子は、互いに作用し合っているため各原子について詳細に磁気特性を知ることは難しい。しかし、磁気特性を分子場近似という近似理論を用いて計算を行い、その傾向を見ることができる。分子場近似とは、ある磁気モーメントに着目したとき、周囲の磁気モーメントの及ぼす相互作用をある平均的な磁場と近似するものである。そこで、 N 個の原子で構成される磁性体の、原子一個に注目し、周りの原子群から受ける交換相互作用を磁場(分子磁界)で近似し、計算を行う。それをすべての原子に当てはめることで、その全体の磁気特性を近似計算する。TAMR 媒体には、フェロ磁性体は、Fe やCo と非磁性元素との合金を想定し、非磁性元素は磁性を単純希釈すると仮定した。

2-2-2 フェロ磁性体分子場近似⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

フェロ磁性体 $(\text{TM}_x\text{M1}_{1-x})_{1-z}\text{M2}_z$ の分子場近似を考える。 $\text{TM}_x\text{M1}_{1-x}$ は大きな結晶磁気異方性 K_u を持つFe-PtやCo-Ptなどを想定していて、TMはFe、Coなどの3d遷移金属元素の磁性体、M1はPtなどの添加することで非常に大きな K_u をもつ非磁性体をそれぞれ想定している。M2はCuやCrなどの希釈元素である非磁性元素である。TMの組成が $x(1-z)$ 、非磁性体M1の組成が $(1-x)(1-z)$ 、希釈元素である非磁性元素M2の組成を z とする。

温度 $T(\text{K})$ におけるTMのスピン角運動量の熱平均を $\langle S \rangle$ とすると、温度 $T(\text{K})$ における $\langle S \rangle$ と、

分子磁界 H は次式で与えられる。

$$\langle S \rangle = SB(g\mu_B SH / k_B T) \quad (2-1)$$

$$H = \frac{2J_{11}z_{11}\langle S \rangle}{g\mu_B} \quad (2-2)$$

ここで、 S は TM のスピン、 $B_s(x)$ は Brillouin 関数

$$B_s(x) = \frac{2S+1}{2S} \coth\left(\frac{2S+1}{2S}x\right) - \frac{1}{2S} \coth\left(\frac{x}{2S}\right) \quad (2-3)$$

g は TM 原子の g 係数、 μ_B は Bohr 磁子、 H は TM 原子に働く分子磁界、 k_B は Boltzmann 定数、 J_{11} は TM 原子間の交換積分 ($J_{11} > 0$)、 z_{11} は一つの TM 原子の最近接位置にある TM 原子の数で、最近接原子の総数は 12 個と仮定し、

$$z_{11} = 12x(1-z) \quad (2-4)$$

となる。温度 T における、TM の磁化 $M_s(T)$ は、

$$M_s(T) = N\mu_B [x(1-z)g\langle S \rangle] \quad (2-5)$$

となる。ここで N は単位体積当たりの全原子数で、

$$N = \frac{1}{[x(1-z)V_{TM} + (1-x)(1-z)V_{M1} + zV_{M2}]} \quad (2-6)$$

と近似される。ここで V_{TM} 、 V_M 、はそれぞれ TM 原子、非磁性原子 M 一個当たりの体積である。計算に用いた各元素の体積 V を表 2-1 に示す。

表 2-1 原子一個当たりの体積

Volume of atom	
element	$V(10^{-23} \text{ cm}^3)$
Fe	1.17
Co	1.10
Pt	1.47
Cr	1.20
Cu	1.18

Brillouin 関数において、 $x \ll 1$ のときは、

$$B_s(x) \approx \frac{(S+1)x}{3S} \quad \text{と近似でき、}$$

$$A_{11} = J_{11}z_{11}S(S+1) \quad (2-7)$$

とおくと Curie 温度 T_c は $t_c = 3k_B T_c$ として、

$$\begin{vmatrix} 2A_{11} - t_c & 0 \\ 0 & -t_c \end{vmatrix} = 0 \quad (2-8)$$

より求められる。これを解くと

$$T_c = \frac{2A_{11}}{3k_B} = \frac{2J_{11}z_{11}S(S+1)}{3k_B} \quad (2-9)$$

となる。Curie 温度は(2-9)式により、 $S(S+1)$ に比例することがわかる。

また、異方性エネルギー K_u は M_s の 2 乗に比例と仮定すると、

$$K_u = Nx(1-z)D_1 \langle S \rangle^2 \quad (2-10)$$

で表される。 D_1 は異方性定数である。

以上のフェロ磁性体分子場近似によって、温度 T における $M_s(T)$ 、 $K_u(T)$ を知ることができる。また、式(2-9)から、TMの組成と、TM原子間の交換積分を変えることで、Curie温度と飽和磁化を任意に設定することができる。シミュレーションに使用する媒体を一斉回転モデルの垂直磁化膜と仮定すれば、保磁力 H_c と異方性磁界 H_k は等しい。温度 T における媒体の保磁力 $H_c(T)$ は、

$$H_c(T) = H_k(T) = \frac{2K_u(T)}{M_s(T)} \quad (2-11)$$

と表せる。これにより、媒体の温度特性をシミュレーションすることができる。

2-2-3 ニュートン法⁽¹⁵⁾

分子場近似を解くためには、非線形関数を解かなければならないため、本研究ではニュートン法を使用した。以下にその概要を示す。

$$f(x) = 0 \quad (2-12)$$

の求める解を x_0 とすると、その近似解が x_1 与えられていれば、一般に x_1 よりも近い近似解 x_2 を

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (2-13)$$

と求めることが出来る。求めた x_2 を使い同じ操作をして新たな近似解を求め、この操作を繰り返すことで、求める解 x_0 により近い近似解を求めることが出来る。つまり適当な初期値から出発し、

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2-14)$$

の計算を繰り返せば x_0 の値を近似的に求めることが出来る。このような解法をニュートン法と呼ぶ。

第3章 計算条件

3-1 2Tbpsi, granular, TG

3-1-1 記録領域周辺

熱アシスト磁気記録 (Thermally Assisted Magnetic Recording, TAMR) によって 2Tbit/inch² (2Tbpsi) の記録密度で、グラニューラー媒体に記録することを考える。線記録密度は 2600kFluxChanges/Inch (2600kFCI)、トラック密度は 870kTracks/Inch (870kTPI) とする。TAMR には Thermal Gradient (TG)、Field Gradient (FG)、と Dual Gradient (DG) があるが、thermal gradient で考える。

グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを図 3-1 に示すように 4.5nm とし、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm とする。記録面密度が 2Tbpsi であるので、1bit を約 10 個の微粒子で記録することになる。なお、グラニューラー媒体であるので、微粒子は不規則に並んでいるが、図では簡単のため規則的に並べてある。

TG であるので、記録領域を含む広い範囲にヘッド磁界 H_w を印加し、記録領域のみに光を当てて加熱する。書き込みが完了したときの微粒子の温度を T_w とし、 $T_w = 500\text{K}$ とする。

書き込みが完了して冷却過程にある微粒子のうち、 T_w からトレーリング側に 1bit ずれた微粒子の温度を T_{rec} とし、その差を $\Delta T = T_w - T_{\text{rec}}$ とする。 T_{rec} の微粒子には 1bit 前の情報が記録されているが、 T_w の微粒子に記録する際、 T_{rec} の微粒子の情報は保持されなければならない。

ビット間距離 Δx は、線記録密度 2600kFCI であるので

$$\Delta x = \frac{2.54 \times 10^7 (\text{nm})}{2600 \times 10^3 (\text{bit})} = 9.8 (\text{nm/bit}) \text{ となる。媒体の温度勾配 (冷却速度) } \partial T / \partial x \text{ を}$$

$\partial T / \partial x < 10 \text{ K/nm}$ とすると、 $\Delta T / \Delta x < 10 \text{ K/nm}$ となるので、 $\Delta T < 98 \text{ K}$ となり、媒体としては $T_{\text{rec}} > 402 \text{ K}$ を満たさなければならない。

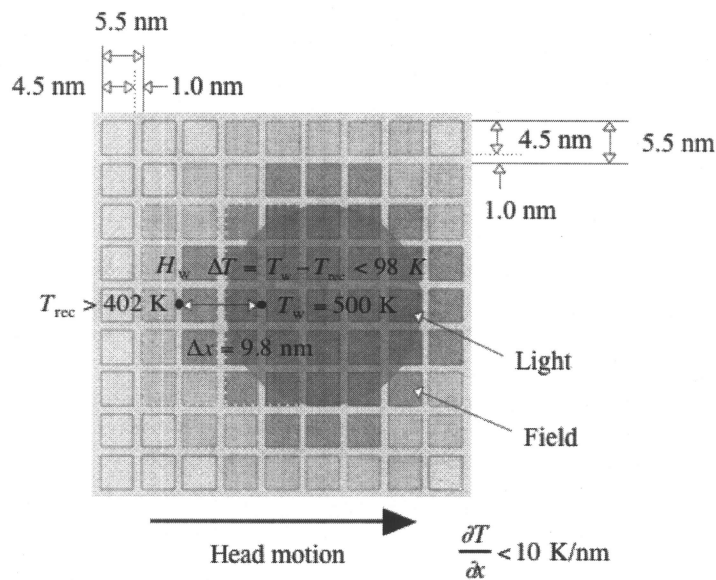


図 3-1 グラニューラー媒体 (2Tbpsi)

3-1-2 ヘッド磁界の分布

ヘッド磁界の分布を図 3-2 に示す。主磁極の大きさをダウントラック方向で 600nm、クロス
 トラック方向で 300nm とすると、書き込み時に隣接トラックにも 600nm×300nm の範囲でヘッ
 ド磁界 H_{adj} が印加されてしまう。トラック密度は 870kTPI であるのでトラック幅は約 29 nm で
 あり、 H_{adj} は約 9 トラックに印加される。加熱機構をいれるために、加熱は主磁極のトレーリ
 ング側の端で行なわれるので、 $H_{adj} > H_w$ となる。書き込み時の隣接トラックの温度を T_{adj} とし、
 周囲温度まで下がるとする。ただし、ハードディスクは動作時に室温よりかなり高温になる。
 TAMR 媒体では Curie 温度が低いので、温度によって磁気特性がかなり変化する。そこで HDD
 の動作温度が約 5～55℃であるとされているため⁽¹⁶⁾、周囲温度の最大を 330K とし、媒体として
 は $T_{adj} > 330 \text{ K}$ を満たさなければならないとした。

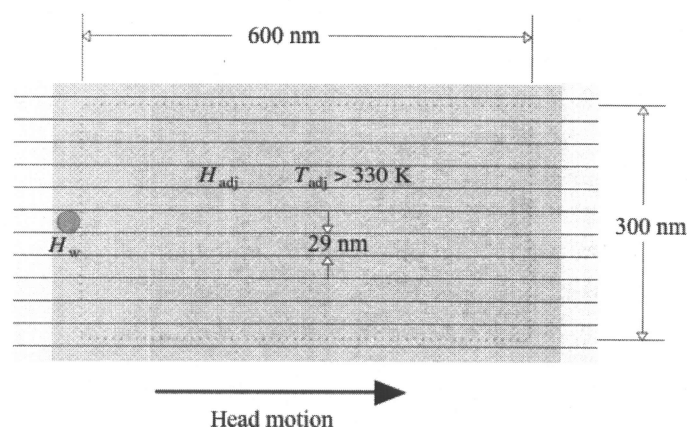


図 3-2 ヘッド磁界分布 (2Tbpsi)

3-1-3 計算条件

表 3-1 に計算条件を示す。300K における飽和磁化 M_s を 500emu/cm^3 に固定する。反磁界が $4\pi M_s = 6.3\text{kOe}$ となるので、 H_w を 8kOe とした。また、 H_{adj} は 10kOe 、膜厚 t は 4.5 nm 、 6.5 nm 、 8.5 nm で計算した。周囲温度の最大 330 K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 以上とする。上で述べたように $T_w = 500\text{ K}$ 、 $\partial T / \partial x < 10\text{ K/nm}$ 、 $T_{adj} > 330\text{ K}$ とする。

表 3-1 計算条件

$H_w(\text{kOe})$	8
$H_{adj}(\text{kOe})$	10
$t(\text{nm})$	4.5, 6.5, 8.5
$M_s(300\text{K})(\text{emu/cm}^3)$	500
$K_u V / kT(330\text{K})$	>60
$T_w(\text{K})$	500
$\partial T / \partial x(\text{K/nm})$	<10
$T_{adj}(\text{K})$	>330

M_s の温度変化は分子場近似で計算し、 K_u は M_s の 2 乗に比例すると仮定した。計算結果の一例を図 3-3 に示す。

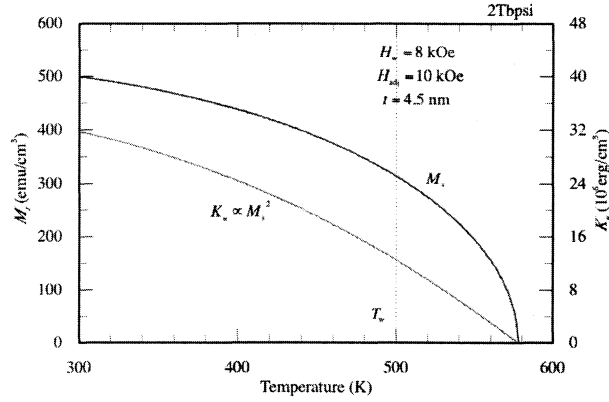


図 3-3 K_u と M_s の温度依存

3-1-4 熱揺らぎ指標

熱揺らぎ指標 K_β は、一般に、

$$K_\beta(T, H) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 \pm \frac{H}{H_c} \right)^2$$

と表わされ、温度 T とともに H の関数である。ここで、 H_c は保磁力（異方性磁界 $H_k = 2K_u / M_s$ に等しいと仮定）である。複号の+は H と M_s が平行の場合、-は反平行の場合である。

周囲温度の最大 330K、無磁界で 10 年間 ($\tau = 3.2 \times 10^8$ s) のデータ保持のために K_β が 60 以上必要であるとし、これを $K_{\beta 0}(330 \text{ K})$ とすると、

$$K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$$

となる。

τ は $\exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))$ に比例するので、

$$\tau \propto \exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))$$

となる。

温度 T_w で磁界 H_w がかかっている状態で、ある時間 τ' 、 M_s の方向が安定であるとき記録が完了したとし、このときの K_β を $K_{\beta w}(T_w)$ とする。媒体がビット間距離 Δx を移動する時間を τ' とする。例えば線速度 $v = 10 \text{ m/s}$ で考えると、 $\tau' = \Delta x / v = 9.8 / 10 = 0.98 \text{ ns}$ となる。このとき $K_{\beta w}(T_w)$ は、

$$\tau' \propto \exp(K_{\beta w}(T_w))$$

となり、これより、

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{0.98 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^8} = \frac{\exp(K_{\beta w}(T_w))}{\exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))}$$

$$K_{\beta w}(T_w) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau} \exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))\right) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau}\right) + K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = 20$$

を得る。

H_w と M_s が平行なので、結局、 $K_{\beta w}(T_w)$ は、

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 20$$

となる。

記録が完了した位置（温度 T_w ）からトレーリング側に 1 ビットずれた位置（温度 T_{rec} ）には 1 ビット前の情報が記録されている。温度 T_{rec} で磁界 H_w がかかっている状態で、ある時間、 M_s の方向が安定である必要がある。ある時間を τ' とし、 H_w と M_s が反平行の場合も考えられるので、このとき必要な K_{β} を $K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}})$ とすると、

$$K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c}\right)^2 > 20$$

となる。

Thermal gradient の場合、書き換えの度に隣接トラックにも H_{adj} が印加される。ダウントラック方向に 600 nm の距離で H_{adj} が印加されるので、例えば線速度 $v = 10 \text{ m/s}$ で考えると、 $\tau'' = 600/10 = 60 \text{ ns}$ の時間だけ H_{adj} が印加される。1 度の書き換えで約 9 トラックに H_{adj} が印加されることも考慮して、 10^5 回の書き換えに対しても情報が保持されたとする。 H_{adj} と M_s が反平行の場合も考えて、必要な K_{β} を $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}})$ とすると、

$$\frac{\tau'' \times 10^5}{\tau} = \frac{60 \times 10^{-9} \times 10^5}{3.2 \times 10^8} = \frac{\exp(K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}))}{\exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))}$$

$$K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_{\text{adj}}}{H_c}\right)^2 > 35$$

が得られる。

なお、時間が 2 倍や 1/2 倍になっても、 $\ln 2 = 0.69$ なので、 K_{β} の値はほとんど変わらない。

以上を図 3-4 にまとめる。

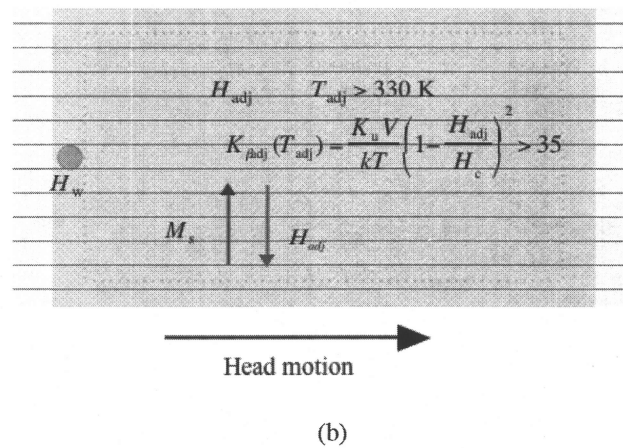
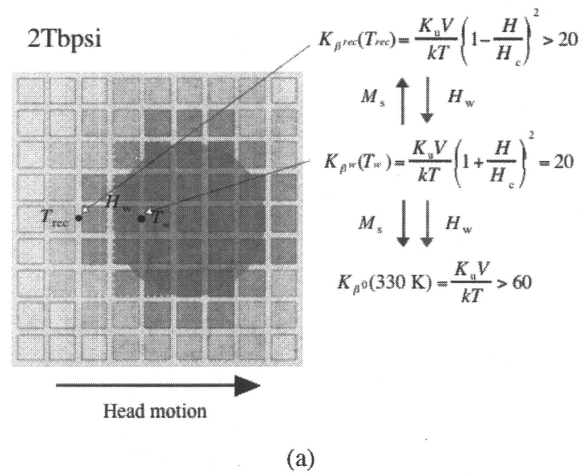


図 3-4 2Tbpsi, granular, TG

3-1-5 計算アルゴリズム

磁気特性の温度変化は 2.2.2 で示した単純な分子場近似により計算する。表 3-2 にパラメータを示す。非磁性元素 M2 の組成 z を 0.2 と仮定し、TM の組成 x 、TM 原子間の交換積分 J_{11} 、異方性定数 D_1 の値を変化させて条件に合う分子場近似パラメータを決定し、熱揺らぎ指標 K_β を求める。

表 3-2 分子場近似パラメータ

g係数	2
TMのスピン量子数 S	0.6

まず任意のキュリー温度 T_c と 300K での飽和磁化 $M_s(300K)$ を設定する。すると式(2-5)、(2-9)より x と J_{11} を決めることができる。また決められた x と J_{11} を用いて、 $K_{\beta w}(T_w)=20$ という条

件から D_1 を決めることができる。したがって $K_u(T)$ が決まり、 $K_{\beta 0}$ 、 $K_{\beta \text{adj}}$ 、 $K_{\beta \text{rec}}$ が決まる。 $K_{\beta 0}(330\text{K}) > 60$ 、 $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) > 35$ 、 $K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) > 20$ の条件をすべて満たし、その上で K_u をできるだけ小さくしたい。そこで繰り返し任意の T_c を調整して、 $K_{\beta 0}(330\text{K}) > 60$ 、 $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) > 35$ 、 $K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) > 20$ の条件を満たし、かつその内の一つが条件の値に限りなく近くなるようなパラメータの組み合わせを見つける。以上のことを図 3-5 に示す。

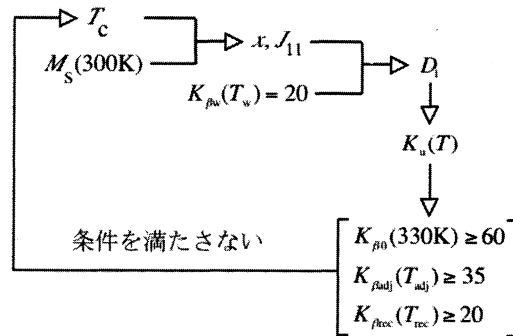


図 3-5 計算アルゴリズム

3-2 4Tbpsi, granular, TG

3-2-1 記録領域周辺

次に 4Tbit/inch² (4Tbpsi) の記録密度で、グラニューラー媒体に記録することを考える。線記録密度は 3200kFluxChanges/Inch (3200kFCI)、トラック密度は 1440kTracks/Inch (1440kTPI) とし、thermal gradient で考える。

グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを図 3-6 に示すように 4.0nm とし、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm とする。記録面密度が 4Tbpsi であるので、1bit を約 6 個の微粒子で記録することになる。

ビット間距離 Δx は、線記録密度 3200kFCI であるので、

$$\Delta x = \frac{2.54 \times 10^7 (\text{nm})}{3200 \times 10^3 (\text{bit})} = 7.9 (\text{nm/bit}) \text{ となる。媒体の温度勾配 (冷却速度) } \partial T / \partial x \text{ を}$$

$\partial T / \partial x < 10 \text{ K/nm}$ とすると、 $\Delta T / \Delta x < 10 \text{ K/nm}$ となるので、 $\Delta T < 79 \text{ K}$ となり、媒体としては $T_{\text{rec}} > T_w - 79 \text{ K}$ を満たさなければならない。

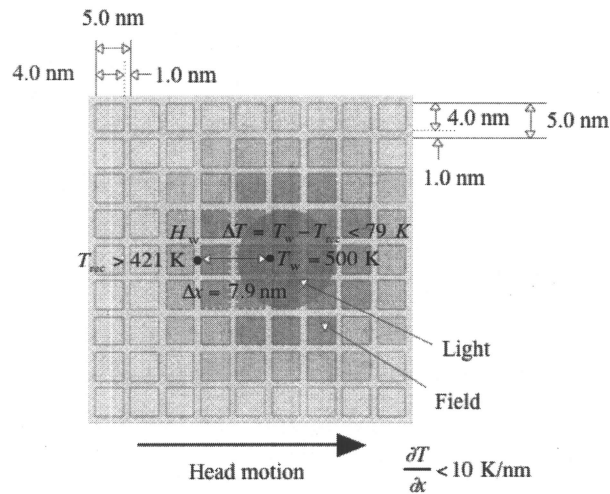


図 3-6 グラニューラー媒体 (4Tbpsi)

3-2-2 ヘッド磁界の分布

ヘッド磁界の分布を図 3-7 に示す。トラック密度は 1440kTPI であるのでトラック幅は約 18 nm であり、 H_{adj} は約 16 トラックに印加される。加熱機構をいれるために、加熱は主磁極のトレーリング側の端で行なわれるので、 $H_{adj} > H_w$ となる。

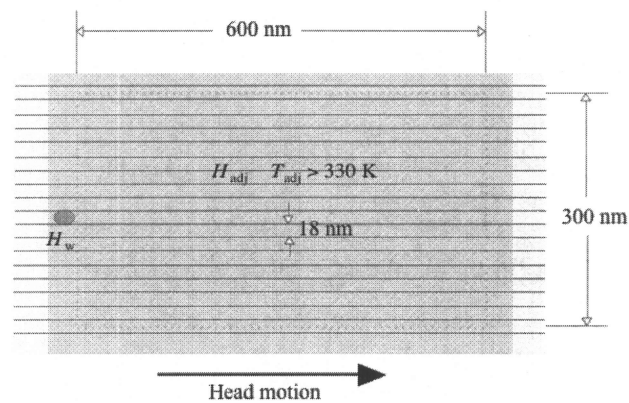


図 3-7 ヘッド磁界分布 (4Tbpsi)

3-2-3 計算条件

表 3-3 に計算条件を示す。300K における飽和磁化 M_s を 500emu/cm³、600emu/cm³、700emu/cm³ とした。反磁界が $4\pi M_s$ となるので、 M_s の値に合わせて H_w を 8.0kOe、9.6kOe、11.2kOe に、また H_{adj} を 10.0 kOe、12.0 kOe、14.0 kOe とした。膜厚 t は 4.0 nm、6.0 nm、8.0 nm で計算した。周囲温度の最大 330 K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 以上とする。 T_w は 500K、550K、600K

で計算した。上で述べたように $\partial T/\partial x < 10 \text{ K/nm}$ 、 $T_{\text{adj}} > 330 \text{ K}$ とする。

表 3-3 計算条件

$H_w (\text{kOe})$	8.0, 9.6, 11.2
$H_{\text{adj}} (\text{kOe})$	10.0, 12.0, 14.0
$t (\text{nm})$	4.0, 6.0, 8.0
$M_s(300\text{K}) (\text{emu/cm}^3)$	500, 600, 700
$K_u V/kT(330\text{K})$	>60
$T_w (\text{K})$	500, 550, 600
$\partial T/\partial x (\text{K/nm})$	<10
$T_{\text{adj}} (\text{K})$	>330

M_s の温度変化は分子場近似で計算し、 K_u は M_s の 2 乗に比例すると仮定した。計算結果の一例を図 3-8 に示す。

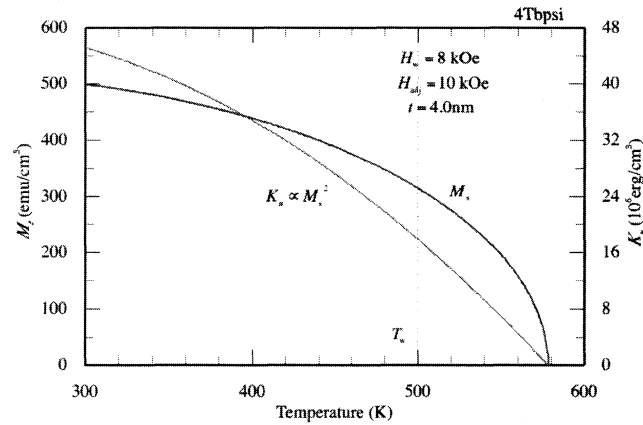


図 3-8 K_u と M_s の温度依存

3-2-4 熱揺らぎ指標

記録密度 4Tbpsi で必要になる $K_{\beta 0}(330 \text{ K})$ と $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}})$ の値は、

$$K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$$

$$K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_{\text{adj}}}{H_c} \right)^2 > 35$$

となる。

例えば線速度 $v = 10 \text{ m/s}$ で考えると、 $\tau' = \Delta x/v = 7.9/10 = 0.79 \text{ ns}$ となる。このとき $K_{\beta w}(T_w)$ は、

$$\tau' \propto \exp(K_{\beta w}(T_w))$$

となり、これより、

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{0.79 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^8} = \frac{\exp(K_{\beta w}(T_w))}{\exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))}$$

$$K_{\beta w}(T_w) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau} \exp(K_{\beta 0}(330 \text{ K}))\right) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau}\right) + K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = 19$$

を得る。

H_w と M_s が平行なので、結局、 $K_{\beta w}(T_w)$ は、

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 19$$

となる。

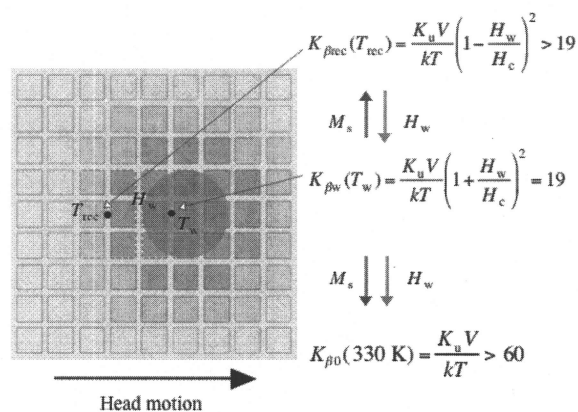
記録が完了した位置（温度 T_w ）からトレーリング側に 1 ビットずれた位置（温度 T_{rec} ）には 1 ビット前の情報が記録されている。温度 T_{rec} で磁界 H_w がかかっている状態で、ある時間、 M_s の方向が安定である必要がある。ある時間を τ' とし、 H_w と M_s が反平行の場合も考えられるので、このとき必要な K_{β} を $K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}})$ とすると、

$$K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c}\right)^2 > 19$$

となる。

なお、時間が 2 倍や 1/2 倍になっても、 $\ln 2 = 0.69$ なので、 K_{β} の値はほとんど変わらない。

以上を図 3-9 にまとめる。



(a)

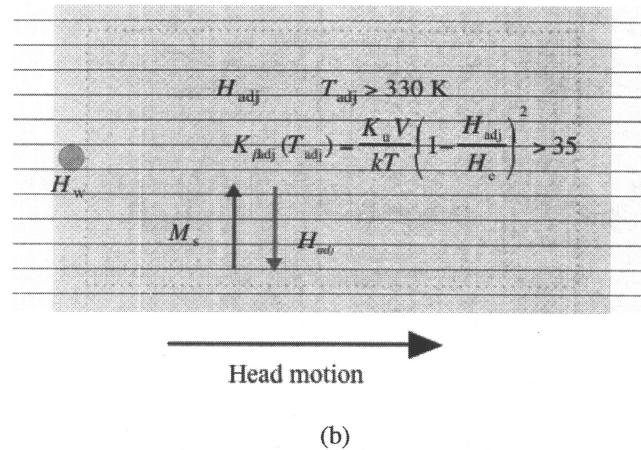


図 3-9 4Tbpsi, granular, TG

3-2-5 計算アルゴリズム

磁気特性の温度変化は 2.2.2 で示した単純な分子場近似により計算する。表 3-2 のパラメータを使う。非磁性元素 M2 の組成 z を 0.2 と仮定し、TM の組成 x 、TM 原子間の交換積分 J_{11} 、異方性定数 D_1 の値を変化させて条件に合う分子場近似パラメータを決定し、熱揺らぎ指標 K_β を求める。

まず任意のキュリー温度 T_c と 300K での飽和磁化 $M_s(300K)$ を設定する。すると式(2-5)、(2-9)より x と J_{11} を決めることができる。また決められた x と J_{11} を用いて、 $K_{\beta w}(T_w)=19$ という条件から D_1 を決めることができる。したがって $K_u(T)$ が決まり、 $K_{\beta 0}$ 、 $K_{\beta adj}$ 、 $K_{\beta rec}$ が決まる。 $K_{\beta 0}(330K) > 60$ 、 $K_{\beta adj}(T_{adj}) > 35$ 、 $K_{\beta rec}(T_{rec}) > 19$ の条件をすべて満たし、その上で K_u をできるだけ小さくしたい。そこで繰り返し任意の T_c を調整して、 $K_{\beta 0}(330K) > 60$ 、 $K_{\beta adj}(T_{adj}) > 35$ 、 $K_{\beta rec}(T_{rec}) > 19$ の条件を満たし、かつその内の一つが条件の値に限りなく近くなるようなパラメータの組み合わせを見つける。以上のことを図 3-10 に示す。

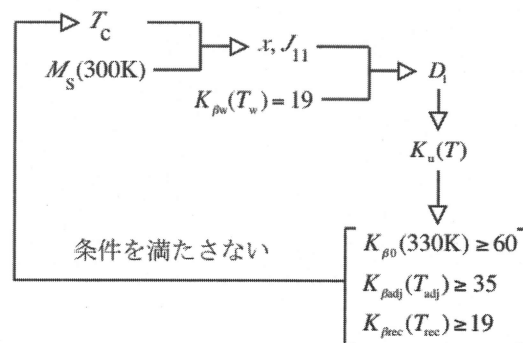


図 3-10 計算アルゴリズム

3-3 2Tbpsi, granular, FG

3-3-1 計算条件

2Tbit/inch² (2Tbpsi)の記録密度で、グラニューラー媒体に記録することを考える。線記録密度は 2600kFluxChanges/Inch (2600kFCI)、トラック密度は 870kTracks/Inch (870kTPI) とし、記録方式は Field Gradient (FG) で考える。

グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを図 3-11 に示すように 4.5nm とし、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm とする。記録面密度が 2Tbpsi であるので、1bit を約 10 個の微粒子で記録することになる。FG であるので、記録時に記録磁界は記録ドットのみに印加され、レーザー光は記録ドットだけでなく隣接トラックにも照射されるとする。光スポット径は Thermal Gradient 方式と比べ、あまり絞る必要はない。記録時、記録直後、および隣接トラックの温度はすべて同じと仮定する。

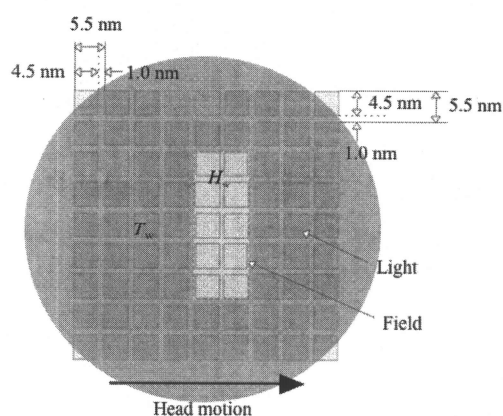


図 3-11 グラニューラー媒体(2Tbpsi, FG)

表 3-4 に計算条件を示す。300K における飽和磁化 M_s を 500emu/cm³ とした。反磁界が $4\pi M_s = 6.3\text{kOe}$ となるので、 H_w を 8.0kOe とした。膜厚 t は 6.5 nm で計算した。周囲温度の最大 330 K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 とする。

表 3-4 計算条件

H_w (kOe)	8.0
M_s (300K) (emu/cm ³)	500
t (nm)	6.5
$K_u V / kT$ (330K)	60

3-3-2 熱揺らぎ指標

隣接トラック、1 ビット前のドットに記録磁界は印加されないため、
 $K_{\beta 0} = K_{\beta \text{adj}} = K_{\beta \text{rec}} = \frac{K_u V}{kT}$ となる。 $K_{\beta \text{adj}} = \frac{K_u V}{kT} = 35$ となる温度を T_{adj} とし、 $T_w = T_{\text{adj}}$ とする。
 記録密度 2Tbpsi、Field Gradient 方式で必要になる $K_{\beta 0}(330 \text{ K})$ と $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}})$ の値は、

$$K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} = 60, \quad K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) = \frac{K_u V}{kT} = 35 \quad \text{となる。}$$

3-3-3 計算アルゴリズム

磁気特性の温度変化は 2.2.2 で示した単純な分子場近似により計算する。表 3-2 のパラメータを使う。非磁性元素 M2 の組成 z を 0.2 と仮定し、TM の組成 x 、TM 原子間の交換積分 J_{11} 、異方性定数 D_1 の値を変化させて条件に合う分子場近似パラメータを決定し、熱揺らぎ指標 K_{β} を求める。

まずキュリー温度 T_c と 300K での飽和磁化 $M_s(300\text{K})$ を設定する。すると式(2-5)、(2-9)より x と J_{11} を決めることができる。また決められた x と J_{11} を用いて、 $K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = 60$ という条件から D_1 を決めることができる。したがって $K_u(T)$ が決まり、 $K_{\beta w}$ 、 $K_{\beta \text{adj}}$ が決まる。以上のことを図 3-12 に示す。

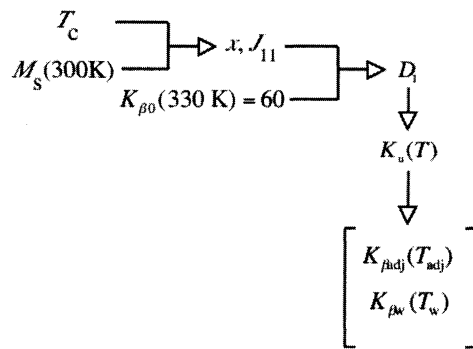


図 3-12 計算アルゴリズム

3-4 2Tbpsi, granular, DG

3-4-1 計算条件

2Tbit/inch² (2Tbpsi) の記録密度で、グラニューラー媒体に記録することを考える。線記録密度は 2600kFluxChanges/Inch (2600kFCI)、トラック密度は 870kTracks/Inch (870kTPI) とし、記録方式は Dual Gradient (DG) で考える。

グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを図 3-13 に示すように 4.5nm とし、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm とする。記録面密度が 2Tbpsi であるので、1bit を約 10 個の微粒子で記録することになる。DG であるので、記録時に記録磁界は記録ドットの上に印加され、かつレーザー光は記録ドットだけに照射されるとする。

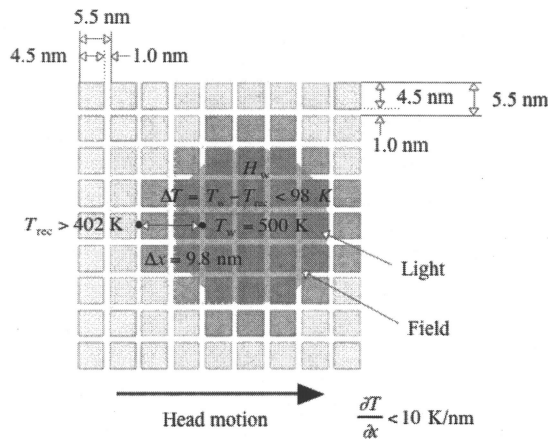


図 3-13 グラニューラー媒体(2Tbpsi、DG)

表 3-5 に計算条件を示す。300K における飽和磁化 M_s を 500emu/cm^3 とした。反磁界が $4\pi M_s$ となるので、 M_s の値に合わせて H_w を 8.0kOe に、また H_{adj} を 10.0kOe とした。膜厚 t は 6.5nm で計算した。周囲温度の最大 330K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 以上とする。 T_w は 500K で計算した。上で述べたように $\partial T / \partial x < 10\text{K/nm}$ 、 $T_{adj} > 330\text{K}$ とする。

表 3-5 計算条件

$H_w(\text{kOe})$	8.0
$H_{adj}(\text{kOe})$	10.0
$t(\text{nm})$	6.5
$K_u V / kT(330\text{K})$	>60
$T_w(\text{K})$	500
$\partial T / \partial x (\text{K/nm})$	<10
$T_{adj}(\text{K})$	>330

3-4-2 熱揺らぎ指標

隣接トラック、1 ビット前のドットに記録磁界は印加されないとすると、

$K_{\beta 0} = K_{\beta adj} = K_{\beta rec} = \frac{K_u V}{kT}$ となる。記録密度 2Tbpsi、Dual Gradient 方式で必要になる

$K_{\beta 0}(330\text{K})$ と $K_{\beta adj}(T_{adj})$ 、 $K_{\beta w}(T_w)$ 、 $K_{\beta rec}(T_{rec})$ は

$$K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} = 60, \quad K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}}) = \frac{K_u V}{kT} = 35$$

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 20, \quad K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) = \frac{K_u V}{kT} > 20 \quad \text{となる。}$$

計算アルゴリズムは 3-1-5 と同様である。

3-5 bit Error Rate(bER)

3-5-1 記録領域における熱揺らぎ指標

記録時に記録磁界の方向と反対方向の磁化をもった粒子が現れ、データ再生のときに誤りの生じる確率について検討する。TAMR 媒体として、グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを 4.5nm、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm、Thermal Gradient 方式、記録密度 4Tbpsi を考える。記録ができた微粒子の記録領域の記録温度 T_w における熱揺らぎ指標 $K_{\beta w}(T_w)$ は、

$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 19$ である。ここで、ヘッド磁界 H_w と磁化が平行であり、ヘッド磁界が磁化の方向を安定にするように作用するので、磁界の符号はプラスとなっている。記録ができなかった微粒子の記録領域の記録温度 T_w における熱揺らぎ指標 K_{β} を $K_{\beta \text{rec}}(T_w)$ とし、

$K_{\beta \text{rec}}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c}\right)^2$ である。ヘッド磁界と磁化が反平行の場合であるので、磁界の符号はマイナスで考える。記録時の記録領域における熱揺らぎ指標 K_{β} を図 3-14 に示す。

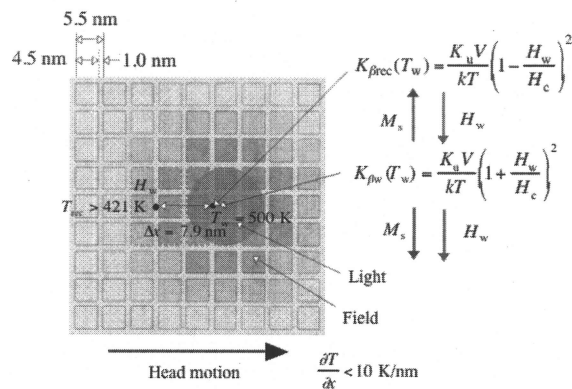


図 3-14 記録領域における熱揺らぎ指標 K_{β}

3-5-2 反転エラーの確率

記録時に記録位置において、粒子の磁化方向がヘッド磁界と平行になる確率は、

$$\exp(K_{\beta w}(T_w)) \quad (3-1)$$

に比例し、反平行になる確率は、

$$\exp(K_{\beta \text{rec}}(T_w)) \quad (3-2)$$

に比例すると考えられる。

したがって、記録時に磁化方向がヘッド磁界の方向でない粒子の確率（反転エラーとなる粒子の確率）は(3-1)と(3-2)を用いて、

$$P = \frac{\exp(K_{\beta \text{rec}}(T_w))}{\exp(K_{\beta w}(T_w)) + \exp(K_{\beta \text{rec}}(T_w))} \quad (3-3)$$

となる。1 ビットが n 個の粒子からなるとき、 r 個の粒子が反転エラーとなるビットの確率は

$${}_nC_r P^r (1-P)^{n-r} \quad (3-4)$$

で与えられる。

3-5-3 計算条件

表 3-6 に計算条件を示す。1 ビットを記録することになる微粒子の数 n を 4 個、5 個として、それぞれで計算する。300K における飽和磁化 M_s を 500emu/cm^3 に固定する。反磁界が $4\pi M_s = 6.3\text{kOe}$ となるので、 H_w を 8kOe とした。また、 H_{adj} は 10kOe 、膜厚 t は 4.0nm 、 6.0nm 、 8.0nm で計算した。周囲温度の最大 330K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 以上とする。 $T_w = 500\text{K}$ 、 $\partial T / \partial x < 10\text{K/nm}$ 、 $T_{\text{adj}} > 330\text{K}$ とする。

表 3-6 計算条件

1ビットの微粒子数 n	4, 5
$H_w(\text{kOe})$	8.0
$H_{\text{adj}}(\text{kOe})$	10.0
$t(\text{nm})$	4.0, 6.0, 8.0
$K_u V / kT(330\text{K})$	>60
$T_w(\text{K})$	500
$\partial T / \partial x (\text{K/nm})$	<10
$T_{\text{adj}}(\text{K})$	>330

第4章 シミュレーション結果

4-1 はじめに

TAMR方式とは、記録媒体を加熱して保磁力を下げて記録する方法である。加熱プロセスにおける書き込み後の冷却過程と書き換えによる隣接トラックの情報安定性が問題となっているので、磁性微粒子の熱的安定性を高く保つことは、TAMR方式を実現させるために非常に重要となる。この章では、様々な条件を変えて磁気特性を計算し、TAMR媒体に適した磁気記録媒体の条件をシミュレーションにより評価し、以下に示す。

4-2 計算結果

4-2-1 Field Gradient 方式(2Tbpsi)

図 4-1 に $t = 6.5\text{nm}$ 、 $T_c = 570\text{K}$ 、 $K_{\beta 0}(330\text{K}) = 60$ での K_{β} と H_c の温度変化を示す。

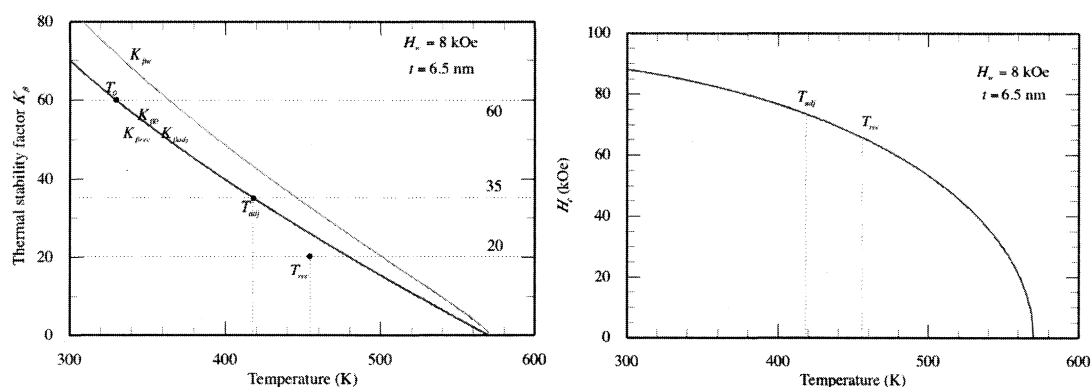


図 4-1 K_{β} と H_c の温度変化

1 回の書き換えでは記録にかかる時間は同じであるが、隣接トラックでは 10^5 回分の時間、情報を保持できなくてはならない。よって $K_{\beta w}(T_w) < K_{\beta adj}(T_{adj})$ となるべきであるが、

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c} \right)^2, \quad K_{\beta adj}(T_{adj}) = \frac{K_u V}{kT}$$

であるため、 $K_{\beta w}(T_w) > K_{\beta adj}(T_{adj})$ となってしまう

う。300K における H_c は 88kOe であるが、 T_{adj} が 418K であり、そのときの H_c は 74kOe までしか下がらない。これは、 K_β の温度変化が比較的直線的に減少するのに対して、 H_c は T_c 付近まで温度が高くなるとあまり減少しないからである。以上より TAMR の本来の目的である媒体の温度を上げて、保磁力 H_c をヘッド磁界よりも下げて記録するという事は、Field Gradient 方式では難しいと考えられる。

4-2-2 膜厚依存性 (2Tbpsi, TG)

図 4-2 に K_β の温度依存性を示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ膜厚 t が 4.5nm、6.5nm、8.5nm のときである。 H_w を 8kOe、 H_{adj} を 10kOe、300K における M_s を 500emu/cm³ に固定する。

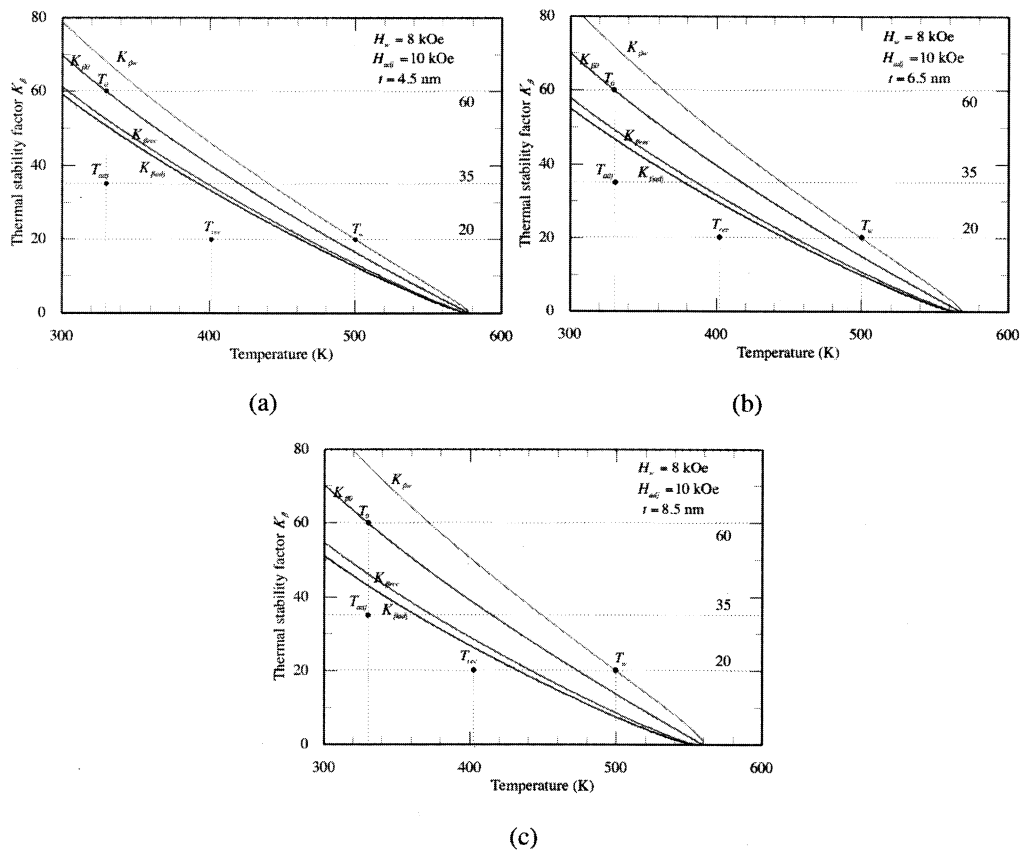


図 4-2 各膜厚における K_β の温度依存性 (2Tbpsi)

$K_{\beta w}$ が 20 のときの温度が $T_w = 500$ K である。周囲温度の最大 $T_0 = 330$ K で $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ は 60 以上必要であるが、どの膜厚でもちょうど 60 となっている。 $T_{rec} = 402$ K で $K_{\beta rec}$ は 20 以上必要で、 $T_{adj} = 330$ K で $K_{\beta adj}$ は 35 以上必要であるが、どの膜厚でもまだ多少余裕がある。したが

って、いずれの場合にも $K_{\beta 0}(330\text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速となる。

t を厚くすると V が大きくなるので K_u を小さくできるが、 $H_c = 2K_u/M_s$ も小さくなる。

$K_{\beta w} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2$ であることから、 $K_{\beta w}$ は $(1 + H_w/H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta w}$ の値は大きくなる。 $K_{\beta w}(T_w) = 20$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が大きくなる。 t を厚くすると、 T_c を低くする必要がある。

K_u の温度変化を図 4-3 に、また H_c の温度変化を図 4-4 に示す。

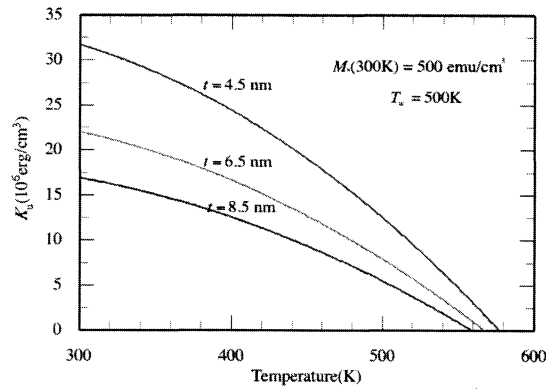


図 4-3 K_u の温度変化 (2Tbpsi $t = 4.5\text{nm}$, 6.5nm , 8.5nm)

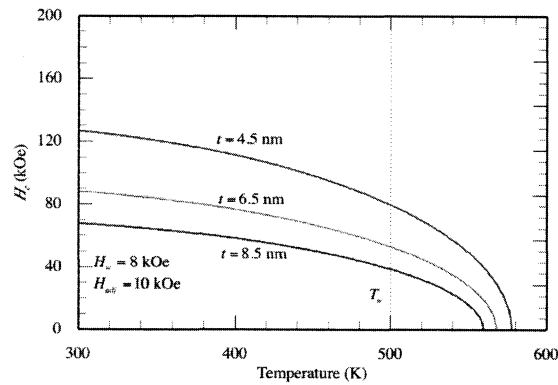


図 4-4 H_c の温度変化 (2Tbpsi $t = 4.5\text{nm}$, 6.5nm , 8.5nm)

t を厚くすると T_c は低くなるので、それだけでは $\partial H_c / \partial T$ が大きくなるように働く。しかし K_u が小さくなるので、それは $\partial H_c / \partial T$ を下げるように働く。 T_c よりも K_u のほうが $\partial H_c / \partial T$ に対して及ぼす影響が大きいため、 t を厚くすると $\partial H_c / \partial T$ は小さくなる。すべての膜厚 t で記録温度 $T_w = 500\text{K}$ における H_c は $H_w = 8.0\text{kOe}$ より大きいが、書き込み完了の定義が、温度 T_w で磁界 H_w がかかっている状態で、ある時間 τ' 、 M_s の方向が安定であるとき記録が完了したとし、このときの K_β を $K_{\beta w}(T_w) = 20$ としているのであって、 $H_w = H_c$ のときではないからである。なお媒体の T_c は T_w より 60K - 78K 高いので、書き込みの際は $H_w > H_c$ となるまで十分加熱する必

要があると考えられる。

膜厚依存に対する計算結果を表 4-1 にまとめる。

表 4-1 TAMR 特性 (2Tbpsi 膜厚依存)

H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0
t (nm)	4.5	6.5	8.5
M_s (300K)(emu/cm ³)	500	500	500
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	31.7	22.1	16.9
H_k (300K)= H_k (300K)(kOe)	127	88	68
T_c (K)	577.7	568.1	559.6
$K_u V/kT$ (300K)	70	70	70
$K_u V/kT$ (330K) > 60	60	60	60
T_w (K)	500	500	500
T_{rec} (K) > 402	467	454	442
$\partial T / \partial x$ (K/nm) < 10.0	4.2	5.8	7.3
$H_c(T_w)$ (kOe)	79.7	52.8	38.6
$H_c(T_{rec})$ (kOe)	92.8	66.0	51.8
$\partial H_c / \partial T$ (Oe/K)	396.4	286.6	227.9
$\partial H_c / \partial x$ (Oe/nm)	1656	1669	1673
T_{adj} (K) > 330	393	378	363

どの膜厚でも $K_{\beta 0}(330\text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速になっている。 $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ の値が室温 300K

と周囲温度の最大 330K との間で 10 も変化している。 T_c が低いために少しの温度変化で磁気特性が大きく変化する。 また HDD は動作時にかなり高温になる。 無磁界で 10 年間のデータ保持のために K_{β} の値が 60 以上必要であるとしているが、 $K_{\beta 0}(300\text{ K}) > 60$ とすると周囲温度が 330K となったときに $K_{\beta 0}$ の値が 10 も下がってしまい熱的安定性がかなり悪くなってしまう。 したがって熱揺らぎ指標の計算条件を $K_{\beta 0}(330\text{ K}) > 60$ とする。

t を 4.5nm から 6.5nm に厚くすると V が大きくなり、 K_u は $3.2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ から $2.2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ に小さくなる。 さらに、キュリー温度 T_c も 577.7K から 568.1K へと多少低くなる。 多少 T_c が低くなるものの、 V の増加率 1.44 倍とほぼ同じ大きさの減少率 1/1.45 倍で K_u の値を小さくできるので、 t の増加がそのまま K_u の減少につながる。 T_c を下げると必然的に K_u も下がることになるので、 T_c が低くなると媒体作製が困難になる。 また、膜厚を厚くすると非磁性体できれいに分離されたグラニューラー媒体を作製することが大変難しくなるという別の問題もあるので、 t を厚くすることによって媒体作製に有利になるのか判断することは難しい。

$K_{\beta \text{rec}} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c} \right)^2$ であることから、 $K_{\beta \text{rec}}$ は $(1 - H_w / H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta \text{rec}}$ の値は小さくなる。 T_{rec} が低くなるため、 $\Delta T = T_w - T_{\text{rec}}$ が大きくなり、 $\partial T / \partial x$ が大きくなる。 $\partial H_c / \partial T$ は t を厚くすることによって小さくなったが、 $\partial T / \partial x$ が大きくなるので、 $\partial H_c / \partial x$ はあまり変わらない。 $K_{\beta \text{adj}} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_{\text{adj}}}{H_c} \right)^2$ であることから、 $K_{\beta \text{adj}}$

は $(1 - H_{\text{adj}}/H_c)^2$ に比例する。 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta\text{adj}}$ の値は小さくなるので、 T_{adj} は低くなる。 $\partial T/\partial x < 10 \text{ K/nm}$ と $T_{\text{adj}}(\text{K}) > 330(\text{K})$ にはまだ余裕があるが、 t を厚くしていくとそれぞれ条件を満たすことがきつくなっていく。

4-2-3 膜厚依存性 (4Tbpsi, TG)

次に記録密度を 4Tbpsi と想定したときの膜厚依存性を考える。図 4-5 に K_{β} の温度依存性を示す。(a)、(b)、(c) はそれぞれ膜厚 t が 4.0nm、6.0nm、8.0nm のときである。 H_w を 8kOe、 H_{adj} を 10kOe、300K における M_s を 500emu/cm^3 に固定する。

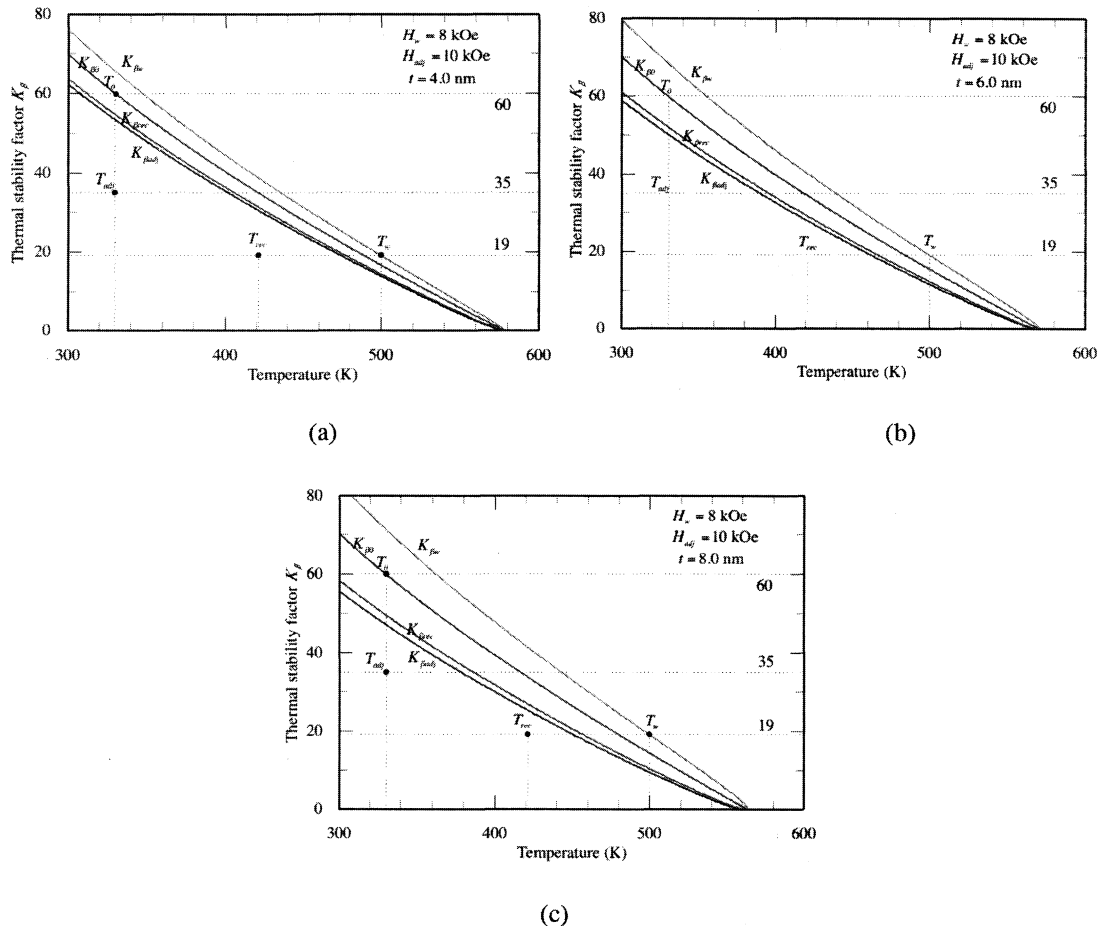


図 4-5 各膜厚における K_{β} の温度依存性 (4Tbpsi)

$K_{\beta w}$ が 19 のときの温度が $T_w = 500\text{K}$ である。周囲温度の最大 $T_0 = 330\text{K}$ で $K_{\beta 0} = K_u V/kT$ は 60 以上必要であるが、どの膜厚でもちょうど 60 となっている。 $T_{\text{rec}} = 421\text{K}$ で $K_{\beta\text{rec}}$ は 19 以上必

要で、 $T_{\text{adj}}=330\text{K}$ で $K_{\beta\text{adj}}$ は 35 以上必要であるが、どの膜厚でもまだ多少余裕がある。したが

って、いずれの場合にも $K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速となる。

t を厚くすると V が大きくなるので K_u を小さくできるが、 $H_c=2K_u/M_s$ も小さくなる。

$K_{\beta w} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2$ であることから、 $K_{\beta w}$ は $(1+H_w/H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta w}$ の値は大きくなる。 $K_{\beta w}(T_w)=19$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が大きくなる。 t を厚くすると、 T_c を低くする必要がある。

K_u の温度変化を図 4-6 に、また H_c の温度変化を図 4-7 に示す。

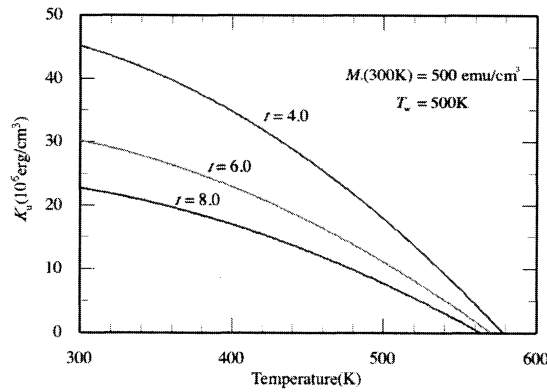


図 4-6 K_u の温度変化 (4Tbpsi $t=4.0\text{nm}$ 、 6.0nm 、 8.0nm)

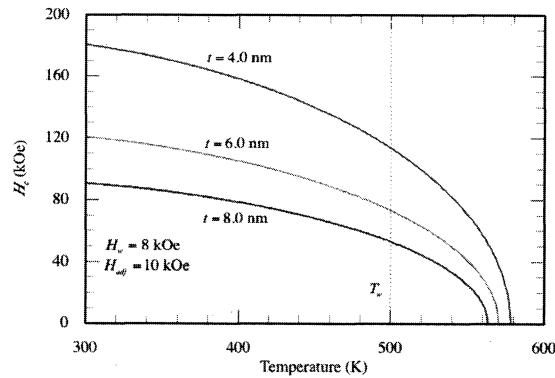


図 4-7 H_c の温度変化 (4Tbpsi $t=4.0\text{nm}$ 、 6.0nm 、 8.0nm)

t を厚くすると T_c は低くなるので、それだけでは $\partial H_c / \partial T$ が大きくなるように働く。しかし K_u が小さくなるので、それは $\partial H_c / \partial T$ を下げるように働く。 T_c よりも K_u のほうが $\partial H_c / \partial T$ に対して及ぼす影響が大きいため、 t を厚くすると $\partial H_c / \partial T$ は小さくなる。すべての膜厚 t で記録温度 $T_w = 500\text{K}$ における H_c は $H_w = 8.0\text{kOe}$ より大きい、書き込み完了の定義が、 $K_{\beta w}(T_w)=19$

としているのであって、 $H_w = H_c$ のときではないからである。なお媒体の T_c は T_w より 63K-78K 高いので、書き込みの際は $H_w > H_c$ となるまで十分加熱する必要があると考えられる。

膜厚依存に対する計算結果を表 4-2 にまとめる。

表 4-2 TAMR 特性 (4Tbpsi 膜厚依存)

H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0
t (nm)	4.0	6.0	8.0
M_s (300K)(emu/cm ³)	500	500	500
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	45.2	30.2	22.7
H_s (300K)= H_k (300K)(kOe)	181	121	91
T_w (K)	578.2	570.4	563.4
$K_u V/kT$ (300K)	70	70	70
$K_u V/kT$ (330K) > 60	60	60	60
T_w (K)	500	500	500
T_{rec} (K) > 421	477	467	457
$\partial T / \partial x$ (K/nm) < 10.0	2.9	4.2	5.4
H_s (T_w)(kOe)	113.7	73.3	53.0
H_s (T_{rec})(kOe)	127.1	86.6	66.5
$\partial H_s / \partial T$ (Oe/K)	584.0	403.7	312.4
$\partial H_s / \partial x$ (Oe/nm)	1700	1686	1700
T_{adj} (K) > 330	402	390	378

どの膜厚でも $K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速になっている。 $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ の値が室温 300K

と周囲温度の最大 330K との間で 10 も変化している。

t を 4.0nm から 6.0nm に厚くすると V が大きくなり、 K_u は $4.5 \times 10^7 \text{erg/cm}^3$ から $3.0 \times 10^7 \text{erg/cm}^3$ に小さくなる。さらに、キュリー温度 T_c も 578.2K から 570.4K へと多少低くなる。多少 T_c が低くなるものの、 V の増加率 1.5 倍とほぼ同じ大きさの減少率 1/1.5 倍で K_u の値を小さくできる。2Tbpsi では $K_u(300\text{K})$ の値は最小で $1.7 \times 10^7 \text{erg/cm}^3$ であったが、4Tbpsi では $2.3 \times 10^7 \text{erg/cm}^3$ と大きくなった。記録密度を高くするためには、より大きな K_u が必要になる。

4-2-4 飽和磁化依存性 (4Tbpsi, TG)

次に記録密度を 4Tbpsi と想定したときの飽和磁化依存性を考える。図 4-8 に K_β の飽和磁化依存性を示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ 300K における飽和磁化 M_s が 500emu/cm³、600emu/cm³、700emu/cm³ のときである。 $M_s(300\text{K})$ の値に合わせて H_w を 8.0kOe、9.6kOe、11.2kOe に、また H_{adj} を 10.0 kOe、12.0 kOe、14.0 kOe とした。膜厚 t を 6.0nm に固定する。

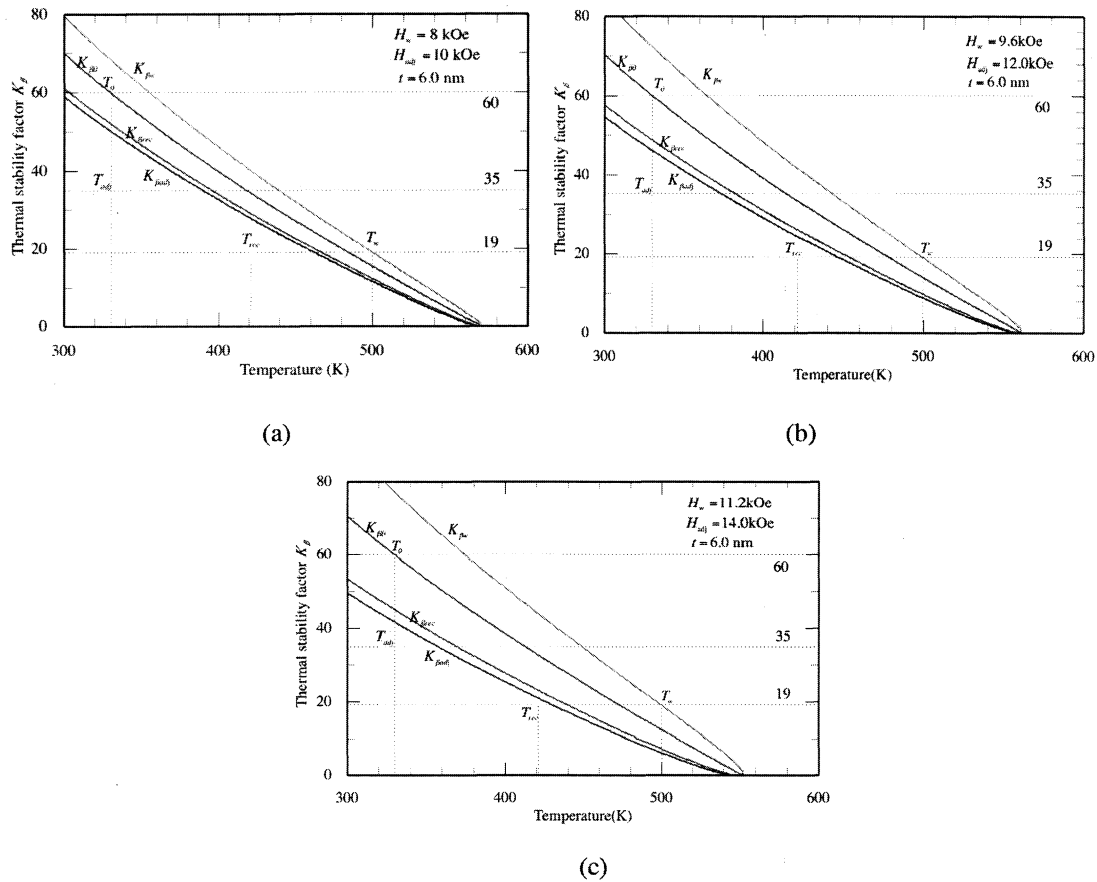


図 4-8 各飽和磁化における K_{β} の温度依存性 (4Tbpsi)

$K_{\beta w}$ が 19 のときの温度が $T_w = 500\text{K}$ である。周囲温度の最大 $T_0 = 330\text{K}$ で $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ は 60 以上必要であるが、どの飽和磁化でもちょうど 60 となっている。 $T_{\text{rec}} = 421\text{K}$ で $K_{\beta \text{rec}}$ は 19 以上必要で、 $T_{\text{adj}} = 330\text{K}$ で $K_{\beta \text{adj}}$ は 35 以上必要であるが、どの飽和磁化でもまだ多少余裕がある。

したがって、いずれの場合にも $K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速となる。

$M_s(300\text{K})$ を大きくすると、 $H_c = 2K_u / M_s$ が小さくなる。また H_w は反磁界 $4\pi M_s$ より大きくしななければならないので、 $M_s(300\text{K})$ を大きくすると H_w は大きくする必要がある。 $K_{\beta w}$ は $(1 + H_w / H_c)^2$ に比例するので、 $M_s(300\text{K})$ を大きくすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta w}$ の値は大きくなる。 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が大きくなる。 $M_s(300\text{K})$ を大きくすると、 T_c を低くする必要がある。

K_u の温度変化を図 4-9 に、 H_c の温度変化を図 4-10 に示す。

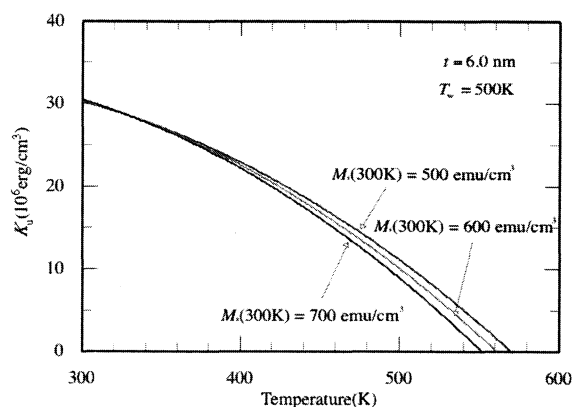


図 4-9 K_u の温度変化 (4Tbpsi $M_s(300K)=500\text{emu/cm}^3$ 、 600emu/cm^3 、 700emu/cm^3)

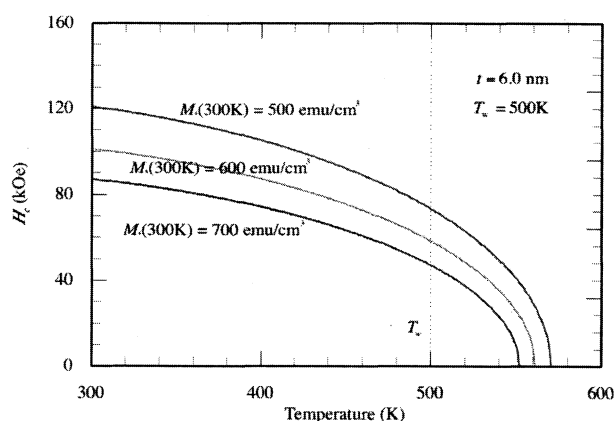


図 4-10 H_c の温度変化 (4Tbpsi $M_s(300K)=500\text{emu/cm}^3$ 、 600emu/cm^3 、 700emu/cm^3)

$M_s(300K)$ を大きくすると T_c は低くなるので、それだけでは $\partial H_c / \partial T$ が大きくなるように働く。しかし H_c が小さくなるので、それは $\partial H_c / \partial T$ を下げるように働く。 T_c よりも H_c のほうが $\partial H_c / \partial T$ に対して及ぼす影響が大きいため、 $M_s(300K)$ を大きくすると $\partial H_c / \partial T$ は小さくなる。すべての飽和磁化 M_s で記録温度 $T_w = 500K$ における H_c は $H_w = 8.0\text{kOe}$, 9.6kOe , 11.2kOe より大きい、書き込み完了の定義が、 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ としているのであって、 $H_w = H_c$ のときではないからである。なお媒体の T_c は T_w より 52K-70K 高いので、書き込みの際は $H_w > H_c$ となるまで十分加熱する必要があると考えられる。

膜厚依存に対する計算結果を表 4-3 にまとめる。

表 4-3 TAMR 特性 (4Tbpsi 飽和磁化依存)

H_w (kOe)	8.0	9.6	11.2
H_{adj} (kOe)	10.0	12.0	14.0
t (nm)	6.0	6.0	6.0
M_s (300K)(emu/cm ³)	500	600	700
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	30.2	30.3	30.5
H_c (300K)= H_k (300K)(kOe)	121	101	87
T_c (K)	570.4	561.3	552.0
$K_u V/kT$ (300K)	70	70	71
$K_u V/kT$ (330K) > 60	60	60	60
T_w (K)	500	500	500
T_{rec} (K) > 421	467	454	440
$\partial T/\partial x$ (K/nm) < 10.0	4.2	5.8	7.6
H_c (T_w)(kOe)	73.3	58.3	47.1
H_c (T_{rec})(kOe)	86.6	74.4	65.9
$\partial H_c/\partial T$ (Oe/K)	403.7	350.5	313.9
$\partial H_c/\partial x$ (Oe/nm)	1686	2041	2384
T_{adj} (K) > 330	390	374	357

どの飽和磁化でも $K_{\beta 0}(330\text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速になっている。また膜厚 t を 6.0nm に固定し

ているため V は一定であるから、 $M_s(300\text{ K})$ を 500emu/cm³ から 600emu/cm³ に大きくしても、 K_u は $30.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ から $30.3 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ とほぼ同じ値となるが、 T_c は 570.4K から 561.3K に減少する。 T_c を下げると必然的に K_u も下がることになるので、 K_u の値が同じでも T_c が低くなると媒体作製が困難になる。また $M_s(300\text{ K})$ を大きくすると H_w も大きくする必要があるが、 H_w を大きくするには磁気ヘッドの性能向上が必要になってくる。

$K_{\beta rec}$ は $(1 - H_w/H_c)^2$ に比例するので、 $M_s(300\text{ K})$ を大きくすると同じ温度で比較して、 H_c の値は小さくなり、 $K_{\beta rec}$ の値も小さくなる。 T_{rec} が低くなるため、 $\Delta T = T_w - T_{rec}$ が大きくなり、 $\partial T/\partial x$ が大きくなる。 $\partial H_c/\partial T$ は $M_s(300\text{ K})$ を大きくすることによって小さくなったが、 $\partial T/\partial x$ は大きくなる。 $\partial H_c/\partial T$ の減少の割合よりも $\partial T/\partial x$ の増加の割合のほうが大きいので、

$\partial H_c/\partial x$ は大きくなる。 $K_{\beta adj}$ は $(1 - H_{adj}/H_c)^2$ に比例する。 $M_s(300\text{ K})$ を大きくすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta adj}$ の値は小さくなるので、 T_{adj} は低くなる。 $\partial T/\partial x < 10 \text{ K/nm}$ と $T_{adj}(\text{K}) > 330(\text{K})$ にはまだ余裕があるが、 $M_s(300\text{ K})$ を大きくするとそれぞれ条件を満たすことがきつくなっていく。

4-2-5 記録温度依存性 (4Tbpsi、TG)

次に記録密度を 4Tbpsi と想定したときの記録温度依存性を考える。図 4-11 に K_{β} の記録温度依存性を示す。(a)、(b)、(c) はそれぞれ記録温度 T_w が 500K、600K、700K のときである。 H_w を 8kOe、 H_{adj} を 10kOe、300K における M_s を 500emu/cm³、膜厚 t を 6.0nm に固定する。

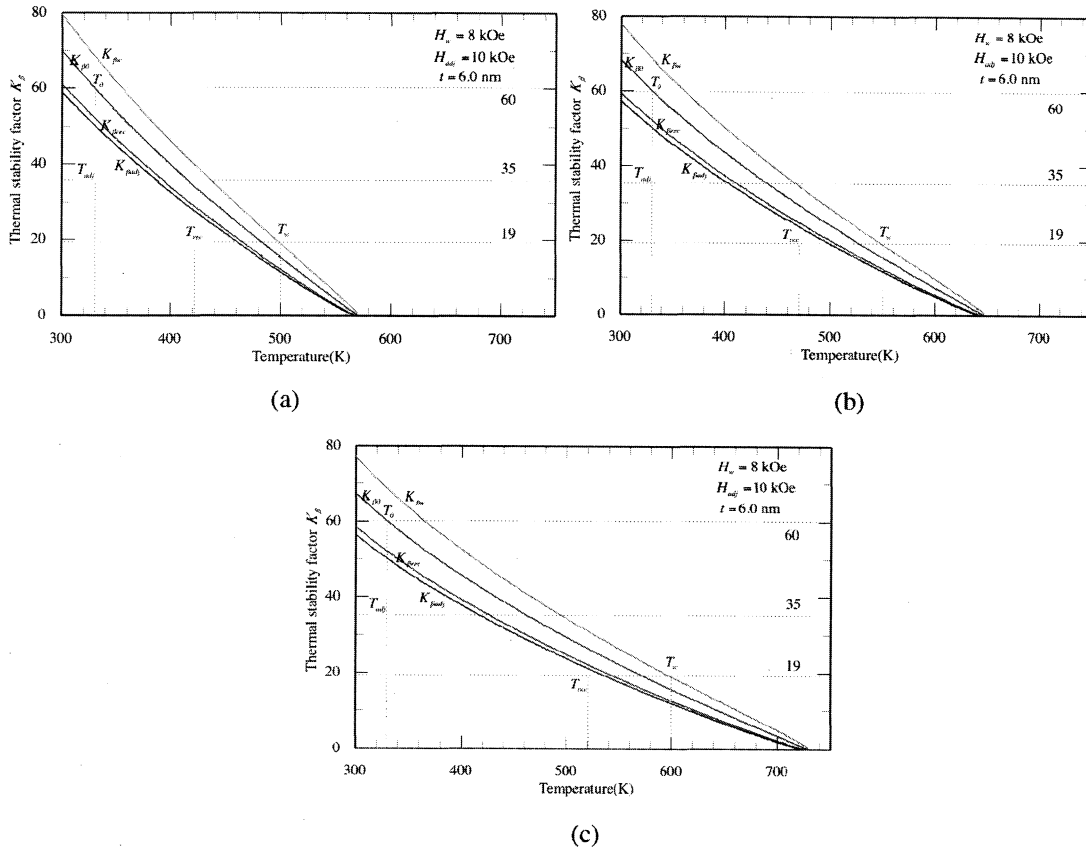


図 4-11 各記録温度における K_{β} の温度依存性 (4Tbpsi)

$K_{\beta w}$ が 19 のときの温度が $T_w = 500\text{K}, 550\text{K}, 600\text{K}$ である。周囲温度の最大 $T_0 = 330\text{K}$ で $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ は 60 以上必要であるが、どの記録温度でもちょうど 60 となっている。 $T_{\text{rec}} = T_w - \Delta T$ で $K_{\beta \text{rec}}$ は 19 以上必要で、 $T_{\text{adj}} = 330\text{K}$ で $K_{\beta \text{adj}}$ は 35 以上必要であるが、どの記録温度でもまだ多少余裕がある。したがって、いずれの場合にも $K_{\beta 0}(330\text{K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速となる。

書き込み温度 T_w を高くすると、 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が小さくなる。 T_w を高くすると、 T_c を高くする必要がある。また、 T_w を高くすると $\Delta T = T_w - T_{\text{rec}}$ が大きくなる。

K_u の温度変化を図 4-12 に、 H_c の温度変化を図 4-13 に示す。

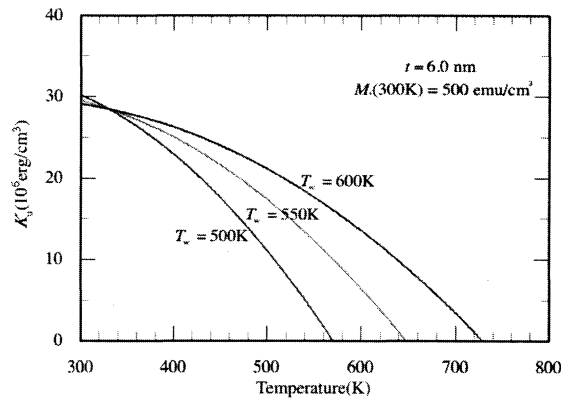


図 4-12 K_u の温度変化 (4Tbpsi $T_w=500\text{K}$ 、550K、600K)

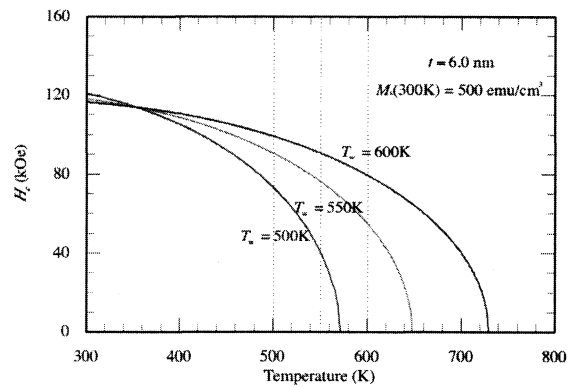


図 4-13 H_c の温度変化 (4Tbpsi $T_w=500\text{K}$ 、550K、600K)

T_w を高くすると、 $H_c(300\text{K})$ は少し下がるがほとんど変化はなく、 T_c は大きく上昇するので、 $\partial H_c / \partial T$ が小さくなるように働く。すべての記録温度 T_w における H_c は $H_w = 8.0\text{kOe}$ より大きい、書き込み完了の定義が、 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ としているのであって、 $H_w = H_c$ のときではないからである。なお媒体の T_c は T_w より 70K-130K 高いので、書き込みの際は $H_w > H_c$ となるまで十分加熱する必要があると考えられる。

記録温度依存に対する計算結果を表 4.4 にまとめる。

表 4-4 TAMR 特性 (4Tbpsi 記録温度依存)

H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0
t (nm)	6.0	6.0	6.0
M_s (300K)(emu/cm ³)	500	500	500
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	30.2	29.5	29.1
H_c (300K)= H_k (300K)(kOe)	121	118	116
T_w (K)	570.4	647.8	729.2
$K_u V/kT$ (300K)	70	68	67
$K_u V/kT$ (330K) > 60	60	60	60
T_w (K)	500	550	600
T_{rec} (K) > $T_w - 79$	467	506	546
$\partial T / \partial x$ (K/nm) < 10.0	4.2	5.6	6.8
H_c (T_w)(kOe)	73.3	76.2	79.4
H_c (T_{rec})(kOe)	86.6	89.1	91.4
$\partial H_c / \partial T$ (Oe/K)	403.7	291.6	222.3
$\partial H_c / \partial x$ (Oe/nm)	1686	1624	1520
T_{adj} (K) > 330	390	404	417

どの記録温度でも $K_{\beta 0}(330\text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ が律速になっている。また膜厚 t を 6.0nm に固定し

ているため V は一定であるから、 T_w を 500K から 550K に高くしても、 K_u は $30.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ から $29.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ とほぼ同じ値となるが、 T_c は 570.4K から 647.8K に大きく上昇する。 T_c が高くなると必然的に K_u の値も大きくなるので、 K_u の値がほぼ同じでも T_c が高くなると媒体作製が有利になる。しかし、レーザーの強度には限りがあるので、 T_c を大幅に高くするためにはレーザーの性能向上が必要になってくる。

T_w を高くすると、 $\Delta T = T_w - T_{rec}$ が大きくなり、 $\partial T / \partial x$ が大きくなる。 $\partial H_c / \partial T$ は T_w を高くすることによって小さくなったが、 $\partial T / \partial x$ は大きくなるので $\partial H_c / \partial x$ はあまり変わらない。

$K_{\beta adj}$ は $(1 - H_{adj} / H_c)^2$ に比例する。 T_w を高くすると、同じ温度で比較して $K_{\beta adj}$ の値は大きくなるので、 T_{adj} は高くなる。 $\partial T / \partial x < 10 \text{ K/nm}$ と $T_{adj}(\text{K}) > 330(\text{K})$ にはまだ余裕があるが、 T_w を大きくすると $\partial T / \partial x < 10 \text{ K/nm}$ を満たす条件はきつくなり、 $T_{adj}(\text{K}) > 330(\text{K})$ を満たす条件はゆるくなる。

4-2-6 Dual Gradient 方式(2Tbpsi)

記録密度 2Tbpsi で Dual Gradient 方式と想定したときの計算結果を表 4-5 に示す。 $t = 6.5\text{nm}$ で H_w を 8kOe、 H_{adj} を 10kOe、300K における M_s を 500 emu/cm^3 に固定する。計算結果を表 4-2 に示す。

表 4-5 TAMR 特性 (2Tbpsi Dual Gradient)

	Dual Gradient	Thermal Gradient
H_w (kOe)	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0
t (nm)	6.5	6.5
M_s (300K)(emu/cm ³)	500	500
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	22.1	22.1
H_s (300K)= H_k (300K)(kOe)	88	88
T_c (K)	568.1	568.1
$K_u V/kT$ (300K)	70	70
$K_u V/kT$ (330K) > 60	60	60
T_w (K)	500	500
T_{rec} (K) > 402	478	454
$\partial T / \partial x$ (K/nm) < 10.0	2.8	5.8
$H_s(T_w)$ (kOe)	52.8	52.8
$H_s(T_{rec})$ (kOe)	59.8	66.0
$\partial H_s / \partial T$ (Oe/K)	315.4	286.6
$\partial H_s / \partial x$ (Oe/nm)	878	1669
T_{adj} (K) > 330	417	378

Dual Gradient 方式にすると、 T_{adj} と T_{rec} が高くなる。すると $\Delta T = T_w - T_{rec}$ が小さくなるので、 $\partial T / \partial x$ を小さくすることができる。しかし、今回の条件では律速が $K_u V / kT(330K) > 60$ であるので、Dual Gradient 方式にしてもメリットが少ない。また、Dual Gradient 方式のような磁気ヘッドを作製することが難しいことから、今回の研究では主に Thermal Gradient 方式で検討を進めた。

4-3 Fe-Pt-Cu(4Tbpsi, TG)

4-3-1 はじめに

次に Thermal Gradient 方式の TAMR 媒体として、Fe-Pt-Cu を用いることを考える。

グラニュー媒体の磁性微粒子の大きさを 4.5nm、微粒子間の非磁性体の幅を 1.0nm とし、記録面密度を 4Tbpsi とする。Fe-Pt は磁気異方性が大きく TAMR 媒体材料の有力候補であるが、そのままではキュリー温度 T_c が高すぎて使えない。そこで Fe-Pt を Cu で単純希釈していき T_c を下げること考える。(Fe_{0.5}Pt_{0.5})_{1-z}Cu_z の媒体を想定し、Cu の組成 z を変えることで T_c を変化させ、 K_u 、 M_s などの磁気特性の変化を計算する。Fe_{0.5}Pt_{0.5} において $T_c = 770$ K、 $M_s(300$ K) = 1000 emu/cm³、 $K_u(300$ K) = 7×10^7 erg/cm³ という条件から、分子場近似パラメータを見積もり、(Fe_{0.5}Pt_{0.5})_{1-z}Cu_z を計算できるようにする。ただし、Cu は非磁性体で、単純希釈とし、Cu を添加しても Fe-Pt の分子場近似パラメータは変わらないと仮定する。原子一個当たりの体積は、表 2-1 のものを使用した。例として、 $T_c = 600$ K、550 K、500 K となる z を求め、 K_u 、 M_s の温度変化を計算する。

図 4-14 に K_u の温度変化を、図 4-15 に M_s の温度変化を示す。

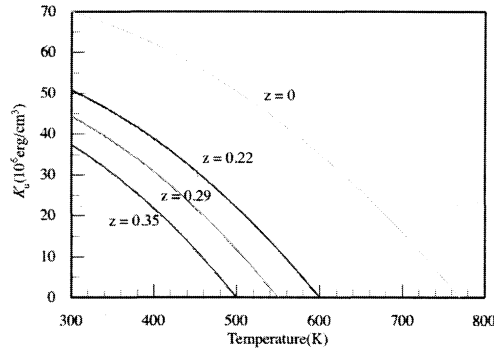


図 4-14 K_u の温度変化($T_c = 770\text{K}$ 、 600K 、 550K 、 500K)

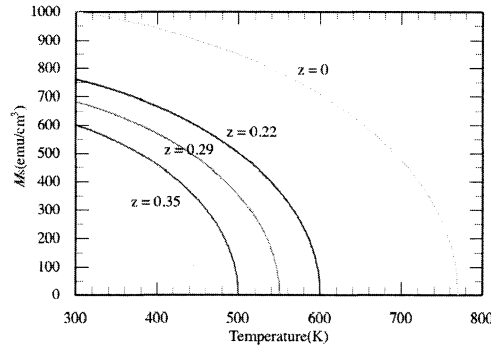


図 4-15 M_s の温度変化($T_c = 770\text{K}$ 、 600K 、 550K 、 500K)

T_c を低くするには z を大きくする必要がある。 T_c を低くすると、 K_u と M_s の値は小さくなる。ただし、 $T_c = 500\text{K}$ にまで T_c が低くなると、Cu の組成 z は 0.35 にまで大きくなるが、そのとき Cu を単純希釈として想定できるかどうかの判断は難しい。

4-3-2 計算アルゴリズム

磁気特性の温度変化は 2.2.2 で示した単純な分子場近似により計算する。表 3-2 のパラメータを使う。Cu の組成 z を変化させて条件に合う T_c 、 K_u 、 M_s を決定し、熱揺らぎ指標 K_β を求める。

まず $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ の条件から x 、 J_{11} 、 D_1 を決める。決められた x 、 J_{11} 、 D_1 と $K_{\beta w}(T_w) = 19$ という条件から z を決めることができ、式(2-5)、(2-9)、(2-10)から T_c 、 $M_s(T)$ 、 $K_u(T)$ を決めることができる。したがって $K_{\beta 0}$ 、 $K_{\beta \text{adj}}$ 、 $K_{\beta \text{rec}}$ が決まる。以上のことを図 4-16 に示す。

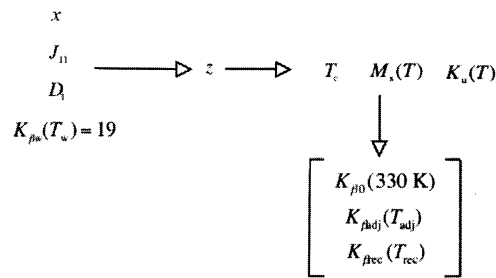


図 4-16 計算アルゴリズム

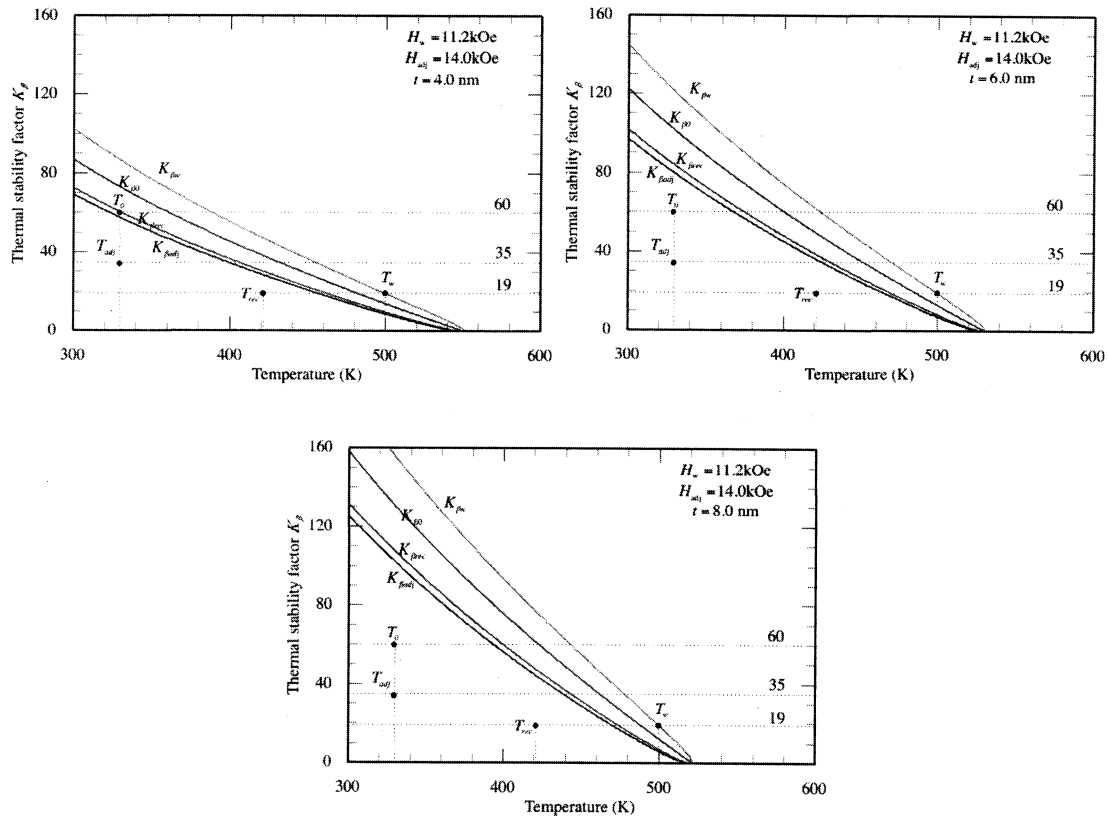
4-3-3 計算結果(Fe-Pt-Cu)

表 4-6 に計算条件を示す。 H_w を 11.2 kOe、 H_{adj} は 14.0 kOe とした。膜厚 t は 4.0 nm、6.0 nm、8.0 nm で計算した。周囲温度の最大 330 K における熱揺らぎ指標 $K_u V / kT$ を 60 以上とする。 $T_w = 500$ K、 $\partial T / \partial x < 10$ K/nm、 $T_{adj} > 330$ K とする。

表 4-6 計算条件(Fe-Pt-Cu)

H_w (kOe)	11.2
H_{adj} (kOe)	14.0
t (nm)	4.0, 6.0, 8.0
$K_u V / kT(330K)$	>60
T_w (K)	500
$\partial T / \partial x$ (K/nm)	<10
T_{adj} (K)	>330

図 4-17 に K_β の温度依存性を示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ膜厚 t が 4.0 nm、6.0 nm、8.0 nm のときである。



(c)

図 4-17 各膜厚における K_{β} の温度依存性 (Fe-Pt-Cu)

$K_{\beta w}$ が 19 のときの温度が $T_w = 500\text{K}$ である。周囲温度の最大 $T_0 = 330\text{K}$ で $K_{\beta 0} = K_u V / kT$ は 60 以上必要であるが、どの膜厚でも余裕がある。 $T_{\text{rec}} = 421\text{K}$ で $K_{\beta \text{rec}}$ は 19 以上必要で、 $T_{\text{adj}} = 330\text{K}$ で $K_{\beta \text{adj}}$ は 35 以上必要であるが、どの膜厚でもまだ余裕がある。

t を厚くすると V が大きくなる。 $K_{\beta w}$ は $(1 + H_w / H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta w}$ の値は大きくなる。 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が大きくなる。 t を厚くすると、 T_c を低くする必要がある。

K_u の温度変化を図 4-18 に、 M_s の温度変化を図 4-19 に、 H_c の温度変化を図 4-20 に示す。

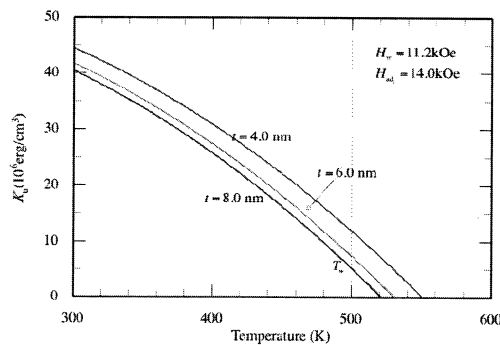


図 4-18 K_u の温度変化 (Fe-Pt-Cu $t = 4.0\text{ nm}$, 6.0 nm , 8.0 nm)

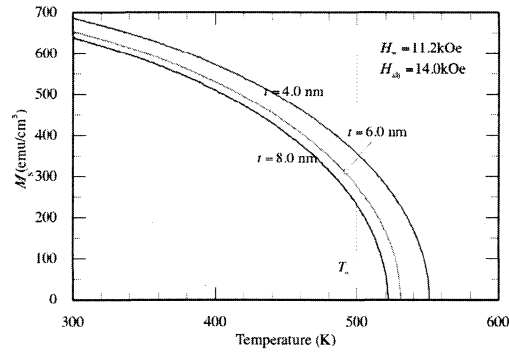


図 4-19 M_s の温度変化 (Fe-Pt-Cu $t = 4.0$ nm、 6.0 nm、 8.0 nm)

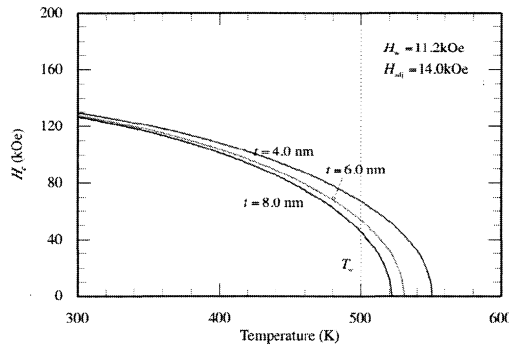


図 4-20 H_c の温度変化 (Fe-Pt-Cu $t = 4.0$ nm、 6.0 nm、 8.0 nm)

t を厚くすると T_c は低くなり、 K_u と M_s の値は小さくなる。 $H_c = 2K_u / M_s$ であるので $H_c(300K)$ は少し下がるがほとんど変化はなく、 $\partial H_c / \partial T$ が大きくなるように働く。すべての膜厚 t で記録温度 $T_w = 500K$ における H_c は $H_w = 8.0kOe$ より大きい、書き込み完了の定義が、 $K_{\beta w}(T_w) = 19$ としているのであって、 $H_w = H_c$ のときではないからである。なお媒体の T_c は T_w より $22K$ - $51K$ 高いので、書き込みの際は $H_w > H_c$ となるまで十分加熱する必要があると考えられる。

膜厚依存に対する計算結果を表 4-7 にまとめる。

表 4-7 TAMR 特性 (Fe-Pt-Cu 膜厚依存)

H_w (kOe)	11.2	11.2	11.2
H_{adj} (kOe)	14.0	14.0	14.0
t (nm)	4.0	6.0	8.0
M_s (300K)(emu/cm ³)	686	653	638
K_u (300K)(10 ⁶ erg/cm ³)	44.5	41.8	40.5
H_w (300K)= H_s (300K)(kOe)	130	128	127
T_w (K)	550.9	534.8	521.5
$K_u V/kT$ (300K)	87	122	158
$K_u V/kT$ (330K) > 60	73	101	130
T_w (K)	500	500	500
T_{rec} (K) > 421	462	469	474
$\partial T/\partial x$ (K/nm) < 10.0	4.8	3.9	3.3
H_w (T_w)(kOe)	67.0	53.8	45.5
H_w (T_{rec})(kOe)	86.5	74.6	66.6
$\partial H_w/\partial T$ (Oe/K)	511.6	673.1	809.0
$\partial H_w/\partial x$ (Oe/nm)	2461	2641	2662
T_{adj} (K) > 330	397	423	438
Cuの組成 z	0.2845	0.3106	0.3228

t を厚くすると、 T_c が低くなる。 T_c が低くなると、 K_u 、 M_s の値が小さくなる。 t を4.0nm から6.0 nm に厚くすると、 K_u は $44.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ から $41.8 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ に小さくなるが、 V は1.5 倍に大きくなる。 K_u の減少率1/1.06 倍よりも V の増加率のほうが大きいので、 t を厚くすると同

じ温度で比較して、 $K_u V/kT$ の値は大きくなる。 $K_{\beta rec} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c}\right)^2$ 、

$K_{\beta adj} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_{adj}}{H_c}\right)^2$ であるため、 $K_{\beta rec}$ と $K_{\beta adj}$ の値は大きくなるので、 T_{adj} と T_{rec} は高くなる。 $\partial T/\partial x < 10 \text{ K/nm}$ と $T_{adj}(\text{K}) > 330(\text{K})$ にはまだ余裕があり、 t を厚くしていくとそれぞれの条件においてさらに余裕を持つことができる。

t を厚くすることによって、 K_u を下げることができ、熱的安定性の面からも媒体作製に有利に働く。しかし、 T_c を下げると必然的に K_u も下がることになるので、 T_c が低くなると媒体作製が困難になる。また T_c を低くすると、Cuの組成 z が大きくなる。 z があまり大きくなると、 z が単純希釈でなくなり、磁気特性に影響を与えてしまうため、シミュレーションで求めた磁気特性を実際にFe-Pt-Cuで実現できるかはわからない。また t を厚くすると非磁性体できれいに分離されたグラニュー媒体を作製することが大変難しくなるという別の問題もあるため、 t を厚くすることによって媒体作製に有利になるのか判断することは難しい。

t を厚くすると、 T_{rec} が高くなるため $\Delta T = T_w - T_{rec}$ が小さくなり、 $\partial T/\partial x$ が小さくなる。 $\partial H_c/\partial T$ は t を厚くすることによって大きくなったが、 $\partial T/\partial x$ が小さくなるので、 $\partial H_c/\partial x$ はあまり変わらない。

4-4 bit Error Rate(bER)

微粒子数 $n=4$ のときの bER を表 4-8 に、 $n=5$ のときの bER を表 4-9 に示す。

表 4-8 $n=4$ のときの bER

t (nm)	4	6	8
$K_{\beta w}(T_w)$	19	19	19
$K_{\beta rec}(T_w)$	13.20791	10.71906	8.496906
grain-error probability P	3.042314E-03	2.532348E-04	2.745063E-05
no grain-error bit(1)	9.878862E-01	9.989874E-01	9.998902E-01
1 grain-error bit(2)	1.205852E-02	1.012170E-03	1.097935E-04
2 grain-error bit(3)	5.519665E-05	3.845725E-07	4.520974E-09
3 grain-error bit(4)	1.122920E-07	6.494121E-11	8.273800E-14
4 grain-error bit(5)	8.566748E-11	4.112386E-15	5.678181E-19
(1)+(2)+(3)+(4)+(5)	1.000000E+00	1.000000E+00	1.000000E+00
bER (1/2)(3)+(4)+(5)	2.771070E-05	1.923512E-07	2.260570E-09

表 4-9 $n=5$ のときの bER

t (nm)	4	6	8
$K_{\beta w}(T_w)$	19	19	19
$K_{\beta rec}(T_w)$	13.20791	10.71906	8.496906
grain-error probability P	3.042314E-03	2.532348E-04	2.745063E-05
no grain-error bit(1)	9.848807E-01	9.987345E-01	9.998628E-01
1 grain-error bit(2)	1.502730E-02	1.264892E-03	1.372381E-04
2 grain-error bit(3)	9.171454E-05	6.407918E-07	7.534750E-09
3 grain-error bit(4)	2.798759E-07	1.623119E-10	2.068393E-13
4 grain-error bit(5)	4.270343E-10	2.055672E-14	2.839013E-18
5 grain-error bit(6)	2.606274E-13	1.041399E-18	1.558696E-23
(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)	1.000000E+00	1.000000E+00	1.000000E+00
bER (4)+(5)+(6)	2.803032E-07	1.623325E-10	2.068422E-13

1 ビットを記録する粒子の数の半分以上が反転エラーとなっている場合、そのビットのデータを誤りのデータであるとする。 $n=4$ のときは反転エラーの数 r が 2 個のときの半分(n が偶数で r がちょうど $n/2$ であった場合は、データが正しくなる場合と誤りになる場合のどちらの可能性もあるため)と r が 3、4 個の場合が誤りのデータであると考えられる。 $n=5$ のときは r が 3、4、5 個の場合が誤りのデータであると考えられる。 r が 1 個増えるたびに発生確率が $10^{-2} - 10^{-3}$ 倍になるので、誤りのデータと考えられるものの中で r が最も小さいものが発生する確率と bER はほとんど変わらない。

t を厚くすると V が大きくなるので K_u を小さくできるが、 $H_c=2K_u/M_s$ も小さくなる。

$K_{\beta w} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c} \right)^2$ であることから、 $K_{\beta w}$ は $(1+H_w/H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta w}$ の値は大きくなる。 $K_{\beta w}(T_w)=19$ に固定してあるため、 $K_{\beta w}$ の温度勾配が大きくなる。 t を厚くすると、 T_c を低くする必要がある。 $K_{\beta rec} = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c} \right)^2$ であること

から、 $K_{\beta\text{rec}}$ は $(1-H_w/H_c)^2$ に比例するので、 t を厚くすると同じ温度で比較して、 $K_{\beta\text{rec}}$ の値は小さくなる。 T_c も下がるので $K_{\beta\text{rec}}$ 全体が小さくなる。 t を厚くすると $K_{\beta w}$ と $K_{\beta\text{rec}}$ の差が大きくなって、bER を小さくできる。しかし、 $K_{\beta\text{rec}}$ が下がるということは 1 つ前のビットの粒子が反転しやすくなるという問題が起きるため、 t を厚くすると反転エラーが起こりにくくなるかの判断は難しい。

1 ビットを記録する粒子の数 n を 4 個から 5 個すると、bER は下がった。これは記録する粒子の数 n が大きくなると、反転エラーとなる粒子 1 個がビット全体に与える影響が小さくなるためだと考えられる。

第5章 総括

近年では扱うデジタル情報の量が増加し、情報記録装置の更なる大容量化、小型化が求められているので、記録密度の向上は現代の情報化社会の必須課題の内の一つである。記録密度を高めるためには、記録媒体の磁性微粒子の体積を小さくすることが必要になるが、熱揺らぎ問題によって記録密度の向上にブレーキがかかっている。熱揺らぎ問題を解決するには、磁気異方性 K_u の大きい材料を使えばよいが、保磁力 H_c が K_u に比例して大きくなるため、現行のヘッドでは記録できなくなる。この問題を解決する方法として、熱アシスト磁気記録 (TAMR) などが提案されている。TAMR は熱によって磁性微粒子の H_c を小さくし情報を記録する方式であり、大きな K_u を持つ媒体を使用できる。しかし、TAMR では磁気ビットへの加熱プロセスにおける書き込み後の冷却過程と書き換えによる隣接トラックの情報安定性が問題になってくる。

これまで磁化分布の主な解析方法として、マイクロマグネティクスに基づく数値計算を行う方法が行われてきた。しかし、マイクロマグネティクスに基づく磁化分布の解析には、非常に膨大な計算が必要であり、計算に非常に長い時間がかかってしまう。また K_u 、 M_s 、 T_c 、 t などのパラメータ間の複雑な相互関係が分かりにくいという欠点があった。今回の研究では、 $K_{\beta 0}(330\text{ K}) > 60$ 必要であるとし、そこから $K_{\beta w}(T_w)$ 、 $K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}})$ 、 $K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}})$ の条件を解析的に計算した。磁気特性は分子場近似により計算した。計算量を少なくできることから、計算にかかる時間を短くすることができる。またパラメータ間の相互関係がよくわかり、媒体の設計指針を考えやすくなった。

本研究では、分子場近似を用いて様々な条件を変えて磁気特性を計算し、TAMR 媒体に適した磁気記録媒体の条件をシミュレーションにより評価する。

・記録方式について

Field Gradient 方式では、TAMR 本来の目的である、媒体の温度を上げて保磁力をヘッド磁界よりも下げて記録することが難しい。Dual Gradient 方式では Dual Gradient 方式のような磁気ヘッドを作製することの難しさに比べ、Dual Gradient 方式にしたときのメリットが少ない。よって Thermal Gradient 方式が好ましいと考えられる。

・膜厚依存性について

媒体の膜厚 t を厚くすると、多少キュリー温度 T_c を下げなければならないが、必要とされる K_u を下げることができる。ただし、 t を厚くすると媒体に必要な冷却速度 $\partial T / \partial x$ が大きくなってしまう。また、膜厚を厚くすると非磁性体できれいに分離されたグラニューラ媒体を作製す

ることが難しくなるという別の問題もあることから、 t を厚くすることによって媒体作製に有利になるのか判断することは難しい。

記録密度 2Tbpsi では $K_u(300K)$ の値は最小で $1.7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ であったが、4Tbpsi では $2.3 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ と大きくなった。記録密度を高くするためには、より大きな K_u が必要になる。

・飽和磁化依存性について

$M_s(300K)$ を大きくしても、必要とされる K_u はほぼ同じ値となるが、 T_c が下がってしまう。 T_c を下げると必然的に K_u も下がることになるので、 K_u はほぼ同じ値でも T_c が低くなると媒体作製が困難になる。また $M_s(300K)$ を大きくすると媒体に必要な冷却速度 $\partial T / \partial x$ が大きくなってしまふ。 $M_s(300K)$ を大きくすると H_w も大きくする必要があるが、 H_w を大きくするには磁気ヘッドの性能向上が必要になってくる。

・記録温度依存性について

記録温度 T_w を高くしても、必要とされる K_u はほぼ同じ値となるが、 T_c は大幅に上昇する。 T_c を高くすると必然的に K_u も大きくなるので、 K_u はほぼ同じ値でも T_c が高くなると媒体作製が有利になる。しかし、レーザーの強度には限りがあるので、 T_c を大幅に高くするためにはレーザーの性能向上が必要になってくる。

・Fe-Pt-Cu について

記録密度 4Tbpsi で Thermal Gradient 方式の TAMR 媒体の条件を満たす材料として Fe-Pt-Cu が適しているのか検討する。 $K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60$ 、 $\partial T / \partial x < 10 \text{ K/nm}$ 、 $T_{\text{adj}}(\text{K}) > 330(\text{K})$ のすべての条件を満たしている。 t を厚くすることによって、 K_u を下げることができ、熱的安定性の面からも媒体作製に有利に働くが、 T_c が低くなってしまふ。 T_c を下げると必然的に K_u も下がることになるので、 T_c が低くなると媒体作製が困難になる。 t を厚くすることによって媒体作製に有利になるのか判断をすることは難しい。また T_c を低くすると、Cu の組成 z が大きくなる。 z があまり大きくなると、Cu が単純希釈でなくなり、磁気特性に影響を与えてしまうため、実際に Fe-Pt-Cu で実現できるかはわからない。

・ bER について

実際は何個かの粒子全部がきちんと記録できる訳ではない。ごく稀に、記録磁界の方向と反対方向の磁化をもった粒子が現れる。TAMR 媒体を検討する場合でも、データ再生のときに誤りの生じる確率 bER も考慮していく必要があると考えられる。

t を厚くすると $K_{\beta w}$ と $K_{\beta rec}$ の差が大きくなって、bER を小さくできる。しかし、 $K_{\beta rec}$ が下がるということは 1 つ前のビットの粒子が反転しやすくなるという問題が起きるため、 t を厚くすると反転エラーが起こりにくくなるかの判断は難しい。1 ビットを記録する粒子の数 n が増えると、bER は下がった。これは記録する粒子の数 n が大きくなると、反転エラーとなる粒子 1 個がビット全体に与える影響が小さくなるためだと考えられる。

今回の研究で得られた結果より、媒体の作製段階における潜在的な問題点を明らかにすることができた。高い磁気異方性 K_u をもつ媒体の作製、膜厚が厚くなっても非磁性体できれいに分離されたグラニューラ媒体を作製する技術、熱アシスト磁気記録に関する磁気ヘッドやレーザー光などの技術と媒体作製条件とのトレードオフを考え、TAMR 媒体に適した磁気記録媒体の条件を検討していく必要があると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり終始懇切丁寧なる御指導を賜った三重大学工学部教授 工学博士 小林正先生に深く感謝いたします。

本研究ならびに本論文をまとめるにあたって、数々の御指導と御教示を頂いた、同学部准教授 工学博士 藤原裕司先生に深く感謝いたします。

日常の研究および様々な面で御協力を頂いた技術専門職員 前田浩二氏に深く感謝いたします。

最後になりますが、北山達哉氏、杉田寛佳氏をはじめ共に研究に励んだナノエレクトロニクス研究室の諸氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 三浦義正：情報化社会とストレージ技術，電子情報通信学会誌 Vol.89, No.11, p.938 , 2006
- (2) 梅村健悟：三重大学修士論文(2008),p.1-3
- (3) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff, *Phys. Rev.Lett.* **61**, 2472 (1988).
- (4) S.S.P.Parkin, *Phys. Rev. Lett* **66**, 2152 (1991)
- (5) IDEMA JAPAN(日本HDD協会)編集：最新ストレージ用語辞典 第2版, 日経BP社 (2008),p.248-253
- (6) 岡村博司, 服部正勝編集：ハード・ディスク装置の構造と応用, CQ出版社(2010), p.31-32
- (7) A. Kikitsu, T. Kai, T. Nagase, and J. Akiyama, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10P701(2005)
- (8) 喜々津, 甲斐, 永瀬, 秋山,：熱アシスト磁気記録のための交換結合二層媒体, 信学技報MR2005-52, p.5-9, February 2006
- (9) 喜々津, 甲斐, 永瀬, 秋山,：熱アシスト磁気記録用交換結合二層媒体, 信学技報 MR2004-64, p. 13-18, March 2005
- (10) 岡、小林：HDD 媒体の数値シミュレーション技術、富士時報 Vol.74 No.6 2001
- (11) IDEMA JAPAN(日本 HDD 協会)編集：最新ストレージ用語辞典 第 2 版, 日経 BP 社 (2008),p.9
- (12) 小口武彦：磁性体の統計理論, 裳華房(1970),pp.33-37
- (13) 林秀晃：三重大学修士論文(2006),p.6-7
- (14) 安田友則：三重大学修士論文(2009),p.20-21
- (15) 戸川隼人：ザ・数値計算リテラシ, サイエンス社(1997), p.66-68
- (16) 岡村博司, 服部正勝編集：ハード・ディスク装置の構造と応用, CQ 出版社(2010), p.36-37